ISSN 2223-0807

Министерство образования и науки РФ
Союз машиностроителей России
Межрегиональный союз научных, инженерных общественных объединений
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ. НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Материалы 3-й Международной научно-практической конференции

20 – 21 июня 2013 года

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2013

УДК 378.1: 621.01

Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й Международной научно-практической конференции. / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 1205 с.

В сборнике представлены материалы, отражающие опыт различных вузов в подготовке бакалавров, специалистов и магистров машиностроительного профиля. Особое внимание уделено отражению в учебных планах и программах учебных дисциплин требований, предъявляемых современным машиностроением к уровню подготовки выпускников вузов. Представлены также результаты научно-исследовательских работ в области машиностроения.

Сборник предназначен для преподавателей вузов, занимающихся подготовкой бакалавров, специалистов и магистров машиностроительного профиля, а также инженеров и научных работников, работающих в области машиностроения.

Оргкомитет конференции благодарит председателя постоянной комиссии по экологии и природопользованию Законодательного собрания Санкт-Петербурга д.т.н., профессора В.П. Ложечко за помощь в издании сборника.

© М.М. Радкевич, А.Н. Евграфов, 2013

Научные редакторы

Михаил Михайлович Радкевич
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: mmfdec@stu.neva.ru.

Александр Николаевич Евграфов
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.evgrafov@spbstu.ru

Программный комитет

Проф. М.М.Радкевич, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. А.Н.Евграфов, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. Л.Б.Аксенов, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. T.Březina, University of Technology, Brno, Czech Republic

Проф. С.Н.Бъчваров, Технический университет, София, Болгария

Проф. М.С.Бундур, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. А.Н.Волков, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. К.А.Зиборов, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

Проф. В.Д.Златанов, Университет пищевых технологий, Пловдив, Болгария

Проф. В.И.Каразин, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. К.П.Манжула, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. В.И.Маслов, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. M.Ceccarelli, University of Cassino and South Latium, Italy

Проф. V.Singule, University of Technology, Brno, Czech Republic

Проф. М.А.Скотникова, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. M.Piska, University of Technology, Brno, Czech Republic

Проф. Н.Н.Шабров, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ 15

Аксенов Л.Б.
Фундаментальное образование с позиций теории нечетких множеств 16

Альшакова Е.Л.
Инновационные методики обучения конструкторско-технологической подготовке производства 23

Афанасьева И.Б., Димент Л.И., Меркулова О.В.
Дидактические возможности графических дисциплин в формировании пространственных представлений студентов 33

Афанасьева И.Б., Князева Е.В.
Личностно-ориентированное обучение в системе непрерывного образования «Школа-ВУЗ» 42

Бояшова Е.П.
О некоторых аспектах воспитания эстетического вкуса у студентов, обучающихся по специальности «дизайн» 51

Бояшова Е.П., Грязнов В.В.
Об особенностях формирования творческой культуры личности студентов-дизайнеров на начальном этапе обучения 57

Букреев В.В., Клюкин В.Ю., Радкевич М.М.
Об организации обучения студентов и переподготовки специалистов для санкт-петербургского автомобильного кластера 65

Буляница А.Л.
Принципы формирования программы курса по выбору для студентов технических факультетов на примере дисциплины «математическая статистика» 69

Д. В. Волошинов, М. С. Кокорин
Использование метода дополнительного ортогонального проецирования в практике преподавания курса геометрического моделирования 76

Донская М. М., Петраш В. И., Солодилова Н. А.
Преподавание дисциплины «САПР в машиностроении» в институте металлургии, машиностроения и транспорта 85

Н. С. Иванова, Г. А. Красильникова, Т. В. Маркова, В. В. Самсонов
Проблемы комплексного обучения студентов инженерной и компьютерной графике 90

Касатиков А. Д., Лейбов А. М., Осокина О. М.
Оценка уровня сформированности it-компетенций студентов-технологов 100

Клевцов В.А., Максаров В.В.
О роли методологии в развитии технических знаний и обучении 109

Лагунова М.В., Ежова Н.В., Кетов Д.В
Использование интернет-технологий в преподавании курса математики для студентов механико-машиностроительного направления ИММиТ 118

Лобкова Н. И., Буляница А.Л., Лагунова М.В.
Опыт реализации курса математики для бакалавров 124

Мкртычев О. В.
О кредитно-балльном рейтинге знаний студентов 129

Наумкин Н. И., Нуянзин Е. А.
Интегрированная схема подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности на основе ФГОС 135

Никитина Т.А.
Опыт анализа и интерактивного обучения колористике дипломированных специалистов по вакуумной технике 143

Ображей Л.М., Танкаян Н.Г.
Пути интенсификации учебного процесса при естественнонаучной подготовке бакалавров 147

Паршин Л. К.
О двухуровневом образовании 153

Семенов Ю.А., Семенова Н.С.
Геометрический анализ плоских рычажных механизмов 157

Смольников Б.А., Пальмов В.А.
Уровни образования в российских технических университетах 168

Танцура Н.П., Блинов Л.Н., Соколов И.А
Инновационно-системный подход к преподаванию химии в технических вузах 172

Шоломицкий А.А., Сотников А.Л., Писанка Е.С.
Перспективы развития дисциплины "начертательная геометрия" 179

Ярусова О.Г., Долгая Н.А., Ватолин М.Ю.
Применение технологии быстрого прототипирования при создании макета для учебных мастерских на примере университета прикладных наук города Аугсбург (Германия) 185

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА 191

Блажнов А.А., Клюкин В.Ю.
Обоснование конечно-элементной модели вакуумного вихревого бесконтактного захвата 192

Волков А.Н., Дьяченко В.А., Петкова А.П., Брунман В.Е., Гичев Ю.В.
Научно-технические проблемы захвата и намотки на бобину тонкой аморфной ленты при ее выходе из литейного комплекса и пути их решения 201

Мацко О.Н., Жавнер М.В.
Нахождение периода колебаний нелинейного пружинного аккумулятора с поступательной парой 205

Назаров А.В., Попов А.Н., Чернова Е.А.
Стенд для моделирования аэродинамических потерь в испытательных центрифугах 210

Павлюченко С.В., Полищук М.Н., Пуленец Н.Е.
Программное обеспечение для лабораторного испытательного стенда 217

Полищук М.Н., Попов А.Н., Челпанов И.Б., Чернова Е.А.
Аэродинамические потери в испытательных центрифугах 227

Седлер М.Х., Седлер М.И.
Разработка робота для проведения диагностических работ внутри трубопроводов сложных конфигураций 238

Тимофеев А.Н., Попов А.Н., Полищук М.Н.
Ударный стенд свободного падения 247

ДЕТАЛИ МАШИН. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ 255

Skotnikova M.A., Mironova E.V., Lanina A.A., Krylov N.A., Homchenko E.V.
Structural and phase transformation in material of blades of steam turbines from titanium alloy after technological treatment 256

Ашейчик А.А., Полонский В. Л.
Прогнозирование изменения физико-механических свойств эластомеров при термическом старении 265

Березина Е.В., Волков А.В., Годлевский В.А., Фомичев Д.С.
К методике исследования оптических свойств мезогенного смазочного слоя 273

Бреки А. Д.
О процессах образования и взаимодействия дисперсных компонентов смазочного слоя в узлах трения управляемых систем 279

Бреки А. Д.
Принципы выбора эффективных смазочных масел с дисперсными добавками для подшипниковых узлов управляемых систем 284

Васильев Е.Ю., Осипчук С.В., Помпеев К.П., Третьяков С.Д., Яблочников Е.И.
Применение современного технологического оборудования и программного обеспечения для изготовления и контроля формообразующих деталей литьевых форм 291

Волков Г.Ю., Колмаков С.В.
Формализация структуры центроидных механизмов и синтез безводильных планетарных передач 301

Елисеев В.В.
Динамика, критические скорости и балансировка термоупругих роторов 311

Ефремов Л.В.
Крутильные колебания привода силовой установки с эластичной муфтой типа LMD 318

Железнов А.Г.
Кинетика адсорбции смазочного материала с трибоактивными присадками поверхностями трения 326

Жуков В.А.
Влияние пластической деформации на усталостную прочность титановых сплавов 331

Колмаков С.В.
Силовой анализ безводильных планетарных передач с однозвенными и двухзвенными сателлитами 337

Нефедьев Е.Ю.
Использование метода акустической эмиссии с применением спектрального анализа сигналов для определения параметров течи в трубопроводах ИТЕР 347

Носова Е. В., Пискунов В. А., Носов В. В.
Расчет на прочность запорного колпака быстродействующего пневматического клапана 356

Попова М.Н.
Трибологические свойства индустриального масла с холестерическими жк-присадками и углеродными нанотрубками 365

Родионов Н.А.
Исследование долговечности подшипников шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ 371

Седакова Е.Б., Козырев Ю.П.
Оценка эффективности наполнения полимерных композитов триботехнического назначения 379

Суханов А. А.
Инженерные расчеты болтовых соединений 387

Шибнев А.А.
Исследование и анализ поверхности трения атомно-силовой микроскопией 403

Яблочников Е. И., Пирогов А. В., Васильков С. Д., Восоркин А. С., Кушнаренко А. А.
Принципы проектирования литьевых форм для производства пилотных серий деталей оптических приборов из термопластичных полимерных материалов 409

КАЧЕСТВО И ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ 418

Грибов С.Ю.
Особенности расчета синергетического эффекта в холдинге 419

Ефимов А.М.
Определение рыночной силы участника канала распределения продукции 426

Кузьмин В. Е.
Гибкое управление проектами в условиях высокой неопределенности 433

Лукашевич Н. С., Гаранин Д. А.
Оценка инвестиционной привлекательности проектов на основе обобщенного показателя и снижения уровня субъективности 441

Маслов В.И., Арустамян А.И., Минаков В.Ф.
Дистанционный контроль в системе управления качеством заливки металла 450

Маслов В.И., Елисеева Е.А.
Решение проблемы обеспечения требований безопасности и качества сливочного масла 460

Маслов В.И., Седлер М.И., Елисеева Е.А.
Разработка методик выявления критических контрольных точек и построения «дома качества» технологического процесса производства сливочного масла 471

Маслов В.И., Седлер М.И., Степанова В.А.
Разработка PLM – системы подготовки научных статей к публикации 481

Маслов В.И., Шуткевич Л.Н.
Повышение качества процессов учета и распределения делового отхода листов металлопроката 491

Николаев Н. А.
Корпоративная социальная отчетность: проблемы повсеместного внедрения 501

Петров И.П.
Разработка прикладных визуальных компонент для машиностроительных расчетов в среде Delphi 507

Попова О.В., Пономарева О.А.
Роль анализа ресурсного потенциала в формировании стратегии промышленного предприятия 517

Салкуцан С.В.
Проведение аудита маркетинга с применением чек-листов 524

Седлер М.И., Егорова Н.П.
Разработка автоматизированного клиент-серверного приложения управления заказами для фабрик ортопедической обуви 530

Троицкий Д.И.
Конфликты профессиональных интересов при конструкторско-технологической подготовке производства 539

Череватенко В.Н.
Применение многоиндексных массивов для описания структуры промышленного рынка 549

Шекшаева Н. Н.
Методическая система поэтапного формирования у студентов технических вузов компетентности в инновационной деятельности 557

Щеголев В. В.
Потребительская ценность товара на промышленных рынках 565

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ 576

Бабанин В.С.
Параметрическое моделирование операционных заготовок 577

Васильев И.А.
Модель распознавания и формирования эмоциональных реакций для

систем управления виртуальными агентами 585

Панюшкина Е.Н., Шаманаев П.А., Наумкин Н.И.
Численное моделирование одномерного процесса двухфазной фильтрации с помощью разрывного метода Галеркина 595

Помпеев К.П.
Размерно-точностной анализ при автоматизированном проектировании надежных технологий 600

Филюков Н.Е.
Модуль администрирования веб-центричной АСТПП 610

МЕХАНИКА МАШИН 617

Алексеева Л.Б., Уваров В.П.
Динамические свойства объекта управления, содержащего вязкоупругую среду, при управляемом движении 618

Андриенко П.А., Козликин Д.П.,. Хисамов А.В, Хлебосолов И.О.
О применении бесконтактных систем измерения в центробежных стендах 623

Борина А.П., Терешин В.А.
Решение задачи о пространственном движении статически неустойчивого шагающего аппарата 631

Бъчваров С.Н., Златанов В.Д.
Метод инверсии в кинематике твердого тела 642

Вайсберг Л.А., Акимова А.В., Иванов К.С.
Новые методы моделирования и расчета вибрационных грохотов и грохотов-сепараторов 651

Верховод В. П.
Изучение кинематической геометрии плоских механизмов в системе GEOGEBRA 659

Вульфсон И. И.
Анализ колебаний в цикловых механизмах при учёте энергии, генерируемой в нестационарных связях 670

Герасун В.М., Жога В.В., Несмиянов И.А., Воробьёва Н.С., Дяшкин-Титов В.В.
Исследование устойчивости погрузочного манипулятора с пространственным исполнительным механизмом 680

Джомартов А.А.
Моделирование динамики ткацкого станка СТБ на SimulationX 691

Евграфов А. Н., Петров Г. Н.
Геометрия и кинематика механизма турбулентного смесителя 701

Ершов Д. Ю.
Оценка влияния технологических погрешностей изготовления узлов механической системы на вибрационные характеристики системы при ее эксплуатации 709

Жога В.В., Гаврилов А.Е., Шурыгин В.А., Даншин А.С., Голубев Д.В.
Мобильный шагающий робот легкого класса 718

Зайцев А. Р.
Оптимизация алгоритмов настройки системы управления сухого фрикционного двойного сцепления 725

Зиборов К.А., Ванжа Г.К., Марьенко В.Н.
Дисбаланс как один из основных факторов, влияющий на работу роторов шахтных вентиляторов главного проветривания 734

Иванов К.С.
Зубчатый вариатор в виде кинематической цепи с двумя степенями свободы и с одним входом 741

Каразин В.И., Колесников С.В., Литвинов С.Д., Суханов А.А., Хлебосолов И.О.
Оптимизация параметров широкополосного виброударного механического стенда 752

Каразин В.И., Козликин Д.П., Хисамов А.В
Особенности расчета деформаций ротора центрифуги 766

Ковалёв М.Д.
О декомпозиции шарнирных схем и геометрической устойчивости ферм 779

Мацюк И.Н., Шляхов Э.М.
Определение кинематических и кинетостатических параметров плоских стержневых механизмов сложной структуры 788

Нестеров А.В., Нестеров С.В., Михайлов А.В.
Определение постоянной времени механической части электропривода 797

Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А.
Режим разгона опорно-поворотного устройства телескопа 804

Платовских М.Ю.
Динамическая модель двухмассовой активной виброзащитной системы 811

Пожбелко В.И.
Алгоритм быстрого структурного анализа и направленного синтеза самоустанавливающихся механизмов современного машиностроения на основе новой формулы подвижности 819

Степанов А. В.
Компьютерные методы расчета состава кинематических цепей 833

Томчина О.П., Резниченко В.В., Терентьева О.В.
Исследование динамики двухроторной вибрационной установки с учетом упругости карданных валов 841

МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ 851

Кононов П.В., Вострое В.Н.
Анализ текстуры заготовок с раскатанным фланцем методом дифракции рентгеновских лучей 852

Кункин С.Н., Аксенов Л.Б.
Технология изготовления раскаткой осесимметричных деталей с фланцем 858
Мамутов В.С.
Вырубка-пробивка особо тонколистовых металлов на магнитно-импульсной установке 867
Прогальский И. Ф., Вендлер Б. Г., Тимофеев В. В., Филиппов Д. А.
Достижение высокой адгезии при высокоскоростном осаждении сверхтвердых покрытий на быстрорежущую сталь 875
Радкевич М.М., Фомин Д.Ю.
ПТМО для схем облойной штамповки поковок удлиненной формы 883
Фомин Д. Ю.
Структурные изменения в сталях при штамповке заготовок в открытых штампах с применением термомеханической обработки 888
СТАНКОСТРОЕНИЕ 895
Бундур М. С., Пелевин Н. А., Прокопенко В. А.
Совершенствование расчетно-вычислительной базы для повышения уровня подготовки специалистов-станкостроителей 896
Картавцев И.С.
Расширение функциональных возможностей у ЧПУ токарного станка по расчету параметров процесса текущего контроля и подналадки оборудования 905
ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ 915
Башкарёв А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С.
Теория передвижения комбинированного поверхностного уплотнителя 916
Бурлуцкий В.С., Позынич К.П., Позынич Е.К.
Ситуационная модель падения башенного крана как инструмент анализа аварии 923
Бурлуцкий В.С., Позынич К.П., Позынич Е.К.
Определение упругих отклонений от линейности деформаций при практическом расчёте телескопических крановых стрел 933
Кондрашов Н.А., Шестопалов А.А.
Рекомендации по выбору параметров машин и технологии уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях 943
Кривда В.В.
Возможность использования карьерного автотранспорта с механизмом изменения центра масс (МЦМ) в условиях повышенных уклонов автодорог 952
Кувшинкин С.Ю.
Определение усилий и мощностей основных приводов карьерного экскаватора без элементов графического решения 961
Курапова Е. В., Манжула К. П.
К определению циклических напряжений в металлоконструкциях кранов пролетного типа 968

Лебедев В. А.
Расчет перекоса металлической конструкции козлового крана 975

Ложечко В.П., Крицын М.С.
О методах получения альтернативного топлива из твердых бытовых отходов 982

Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., Князьков А. С., Панюшкина Е. Н.
Метод снижения энергоемкости фрезерования грунтов за счет регулирования угла резания ножей 992

Поляков Б. Н.
Некоторые рекомендации для повышения точности определения расчётной усталостной долговечности оборудования тяжёлого машиностроения 999

Радаев А. Е.
Формирование структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы 1009

Смольников Б.А., Леонтьев В.А.
Элементы строительной механики орбитальных тросовых конструкций 1020

Стукач А.В.
Расчет конструктивных элементов привода в курсовых и дипломных проектах по строительным машинам 1032

Трофимов В.В., Основская М.В.
Автоматизация «трубохода 300» для диагностики напряжений в сварных швах внутри нефтепроводов 1039

Трофимов В.В., Чижиков В.В., Колесов С.С., Ильясов Р.У.
Применение портативного рентгеновского тензометра для контроля напряженно-деформированного состояния в деталях при поверхностном упрочнении 1045

Харламова Е.Е., Гуреева А.С.
Результаты исследования системы показателей качества гидравлических масел 1050

Чеканин В.А., Чеканин А.В.
Модель управления свободными пространствами контейнеров в задаче ортогональной упаковки объектов 1060

Шестопалов А.А.
Повышение прочности и устойчивости композитных материалов, используемых дорожном строительстве 1066

Шлепетинский А.Ю., Манжула К.П.
Оценка напряженно-деформированного состояния вершины непровара в крестовом сварном соединении 1073

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ 1082

Болобов В.И.
Проблема самовозгорания титана в кислороде и возможные пути ее решения 1083

Ваганов В. В., Андреев Д. С., Мовчан А. В.
Применение информационной технологии “web to print” в издательствах и типографиях вузов 1094
Воробьева Г.А., Складнова Е.Е.
Влияние аэротермоакустической обработки на процесс графитизации в ковких и серых чугунах и их свойства 1102
Гусев М. Н.
Расширенная модель длительности звуков для системы распознавания речи 1112
Дягилев В. И., Коковин В.А., Увайсов С.У.
Построение силового преобразователя с адаптивной системой управления для ультразвуковых технологических установок 1122
Егоров С.А., Свиридов И.А., Шакуров М.А.
Снижение температуры иглы при шитье 1132
Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Белова С.Б., Егоров Е.Н.
Титановые сплавы для автомобилестроения 1137
Иванов А.В., Ваганов В. В, Котов К.А
Разработка алгоритмов синтеза состава технологического оборудования на полиграфическом предприятии 1147
Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев М.А., Гурьев А.М.
Особенности многокомпонентного насыщения легированных сталей 1155
Иванова Т.Г
Боросилицирование – перспективный способ упрочнения изделий из железоуглеродистых сплавов 1161
Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Е.
Сопряженные процессы гидродинамики и теплопереноса газожидкостной сжимаемой среды на установке ковш-печь 1164
Почетуха В.В., Ерастов В.В., Почетуха В.В.
Реологические свойства заэвтектических силуминов при температурах горячей деформации в зависимости от модифицирующего эффекта 1173
Тукаев Р. Ф., Файрушин А.М., Сисанбаев А.В., Кучуков Т.М.
Совершенствование технологии изготовления узла «ТРУБА – ТРУБНАЯ РЕШЕТКА» кожухотрубчатого теплообменного аппарата из жаропрочной стали 15Х5М применением лазерной сварки 1179
Хижняк А.В.
Визуализация процесса горения в замкнутом пространстве 1186
Шлейков А.С., Батов А.В., Емельянов В. О., Мартынов К.В.
Энергосберегающая технология литья по выплавляемым моделям 1195

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ

УДК 378.1

Л.Б.Аксенов

ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ



Леонид Борисович Аксенов, д.т.н., профессор,
Санкт – Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. +7 921 931 6786, E-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru

Аннотация

В докладе показано, почему понятие фундаментального образования относится к нечетким понятиям. Определены причины этой неопределенности. Ядро фундаментального образования носит субъективный характер. Определено, каким образом в текущий момент времени определять соответствие образования понятию фундаментальности.

Ключевые слова: фундаментальное образование, нечеткие множества,

L.B. Aksenov

FUNDAMENTAL EDUCATION FROM THE POSITION OF THEORY OF FUZZY SETS

Professor Leonid B.Aksenov
Sankt-Petersburg State Polytechnical University, Russia,
e-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru

Abstract

This paper describes why notion of fundamental education treats to fuzzy notion. The reasons of this uncertainty are determined in the paper. Core of fundamental education has subjective nature. Shown how at any moment to determine an accordance of education to notion of fundamentality.

Key words: fundamental education, fuzzy sets

Фундаментальность образования – неиссякаемая тема для дискуссий во всех кругах, связанных с образованием на всех его уровнях. При этом возраст участников обсуждения заметно молодеет [1]. Не остаются в стороне ректора и руководители ведущих вузов страны: МГУ [2], МВТУ [3], СПбГПУ [4] и др [5]. Предоставлять образовательные услуги на уровне

фундаментального образования престижно для образовательного учреждения. Это престижно и для потребителей этого образования. Активность в обсуждении проблем фундаментального образования не только не убывает, а, напротив, растет. Но попытки найти общее и четкое определение фундаментального образования оказываются тщетными. Прежде всего, замечается неоднозначность понятия фундаментального образования. В переводе на русский с латинского «fundo» означает:
1) снабжать основанием или дном;
2) основывать, закладывать; класть основание
3) утверждать, укреплять;
4) обеспечивать, надёжно помещать.

Из этих слов трудно составить определение или сформулировать понятие фундаментального образования. В публикациях можно найти многие попытки дать определение, тому, что есть фундаментальное образование. Как, например:

- это образование, которое даёт прочное основание, глубокую опору, обеспечивает возможность дальнейшего развития;
- это универсальные знания и развитое мышление (системное, абстрактное, критическое и т.д.);
- универсальное образование - т.е. человек должен знать хотя бы понемногу обо всём и многие другие.

Многие ученые уже пришли к выводу, что «характеристику фундаментальности образования нельзя считать точным логическим исполнением [6]», основываясь на мысли, высказанной еще Сократом: главнейшее условие истинного знания - точное логическое определение понятия. Действительно, долгое время точность определения понятий считалась основным научным требованием, а все расплывчатое рассматривалось как недостойное серьезного интереса.

Считается, что, что физико-математические науки дают наилучшее развитие такому мышлению - из-за необходимости более усваивать, нежели запоминать, из-за сложных внутренних взаимосвязей, из-за строгости по отношению к корректности высказываний и многого другого. А инструмент, заточенный таким образом, можно применять уже к совершенно разным объектам - не ко всем, конечно.

Фундаментальное гуманитарное образование - это работа с понятиями и смыслами. Потому - знание языков, истории, психологии и т.д. Тоже мышление, которое надо взращивать, но иное.

Однако в постнеклассической науке ситуация изменилась: «было осознано, что одним из средств сделать понятия более соответствующими сложной, динамичной, неопределенной реальности является переход от общих четких понятий к менее четким [6]». Нестрогие и нечеткие понятия не в меньшей степени, чем строгие, являются эффективным орудием познания сложных систем, в том числе технологических [7].

Окружающий нас мир несет в себе, по крайней мере, две стороны нечеткости. Одна из них возникает при построении моделей реальных систем, в том числе и образования. При этом из накопленных человечеством знаний уважаемыми людьми или коллективами людей, но все равно субъективно, выбираются предметы (курсы), их объем и содержание, составляющие, по мнению выбирающих, фундаментальное ядро образования. Очевидно, что этот выбор не является однозначным (рис. 1), а границы «ядра» нечеткими. Критерии отбора и включения материала в фундаментальное ядро в силу его огромного разнообразия вряд ли могут быть формализованы [8].

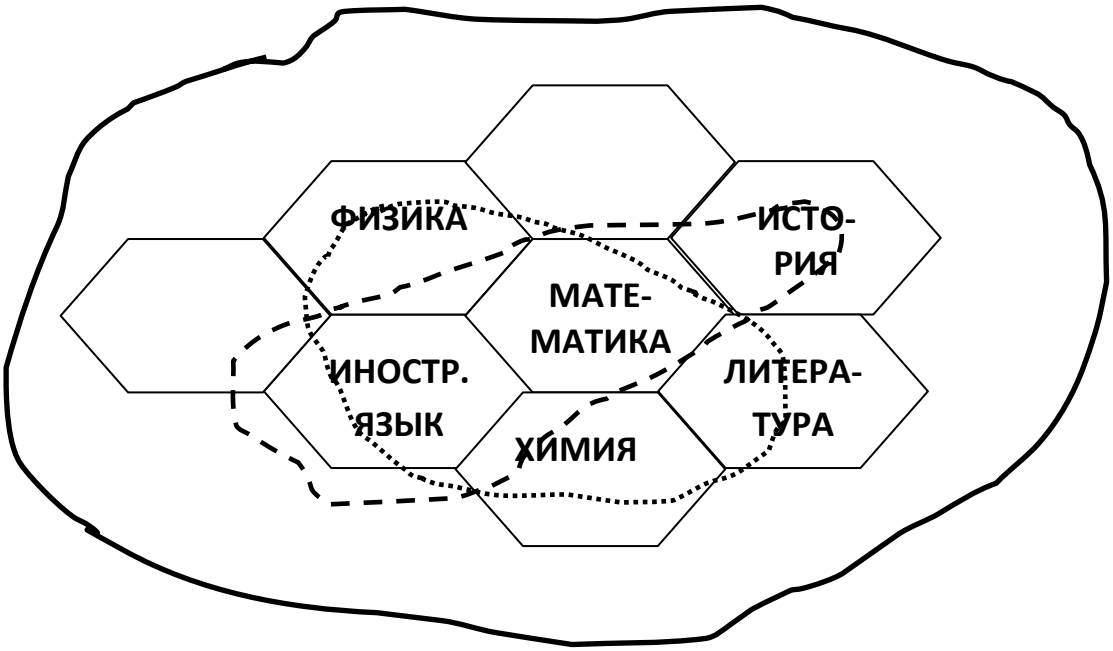


Рис. 1. Нечеткость, возникающая при построении «фундаментального ядра»: ····· ; - - - - возможные границы, выделяемого «ядра»

Понятие нечеткости занимало людей еще много веков назад. Одним из парадоксов определений, когда невозможно чётко различить некоторые понятия является парадокс «О куче». Итак... Одно пшеничное зерно само по себе не является кучей. Два зёрнышка - тоже не куча. Ведь чтобы получилась куча, нужно насыпать достаточно много зерна. Однако, понятие кучи весьма расплывчато. Нельзя сказать, сколько конкретно зёрнышек надо взять, чтобы из них получилась куча: сорок, а может быть, пятьсот? Одно известно точно: 10^{12} зерен уж точно образуют кучу (рис.2).

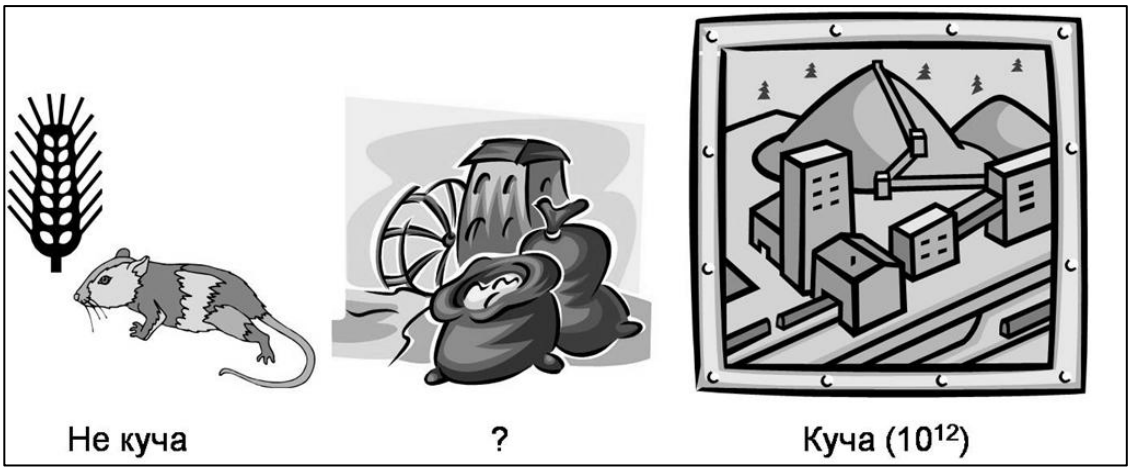


Рис. 2. К парадоксу «О куче»

Описать понятие «куча» можно с позиций теории нечетких множеств, первичные положения которой были заложены французским математиком Э.Борелем [9] в начале XX в.

Понятие «куча» может быть представлено последовательностью неотрицательных чисел p_n, n=1,2,..., где

p_n- доля тех, кто назвал бы n-зерен кучей.

В попытке два момента:

- понятие «куча» описывается функцией, отображающей натуральный ряд чисел (n) в отрезок [0,1].
- указан способ нахождения этой .функции, с помощью экспертных оценок.

Понятие нечеткого множества сформулировано в работе математика Заде [10], при этом нечеткое подмножество A универсального множества U характеризуется функцией принадлежности

$\mu_A: U \rightarrow [0,1]$,

которая ставит в соответствие каждому элементу $u \in U$ число из отрезка [0,1], характеризующее степень принадлежности элемента u подмножеству A. Универсальным множеством U является натуральный ряд чисел 1,2,… Тогда функция принадлежности для парадокса «куча» имеет вид:

$\mu_A(n)=p_n$;

$\mu_A(100)=0$;

$\mu_A(10^{12})=1$.

Таким образом, если следовать методам теории нечетких функций для определения принадлежности выделенного набора дисциплин x_i к нечеткому множеству Ф – фундаментальное образование необходимо узнать мнение некоторого количества экспертов. Функция принадлежности $\mu_Ф(x_i)$ покажет степень достижения фундаментального образования Ф при реализации данной альтернативы x_i.

Поскольку фундаментально ядро (Рис.3) имеет несколько составляющих Φ_i (i=1,..,m), то степень принадлежности i-ой альтернативы нечеткому множеству Ф будет определяться

$$\mu_{\Phi}(x_i)=\min \{ \mu_{\Phi 1}(x_i),....,\mu_{\Phi m}(x_i)\};$$

т.е. минимальным значением из полученных значений функций принадлежности для каждого предмета (дисциплины). Это значит, что если функция принадлежности для одного из предметов оставила 0,3, то и функция принадлежности рассматриваемого набора предметов x_i, также будет равна 0.3 и такой набор дисциплин, вероятно, не может быть признан фундаментальным ядром.

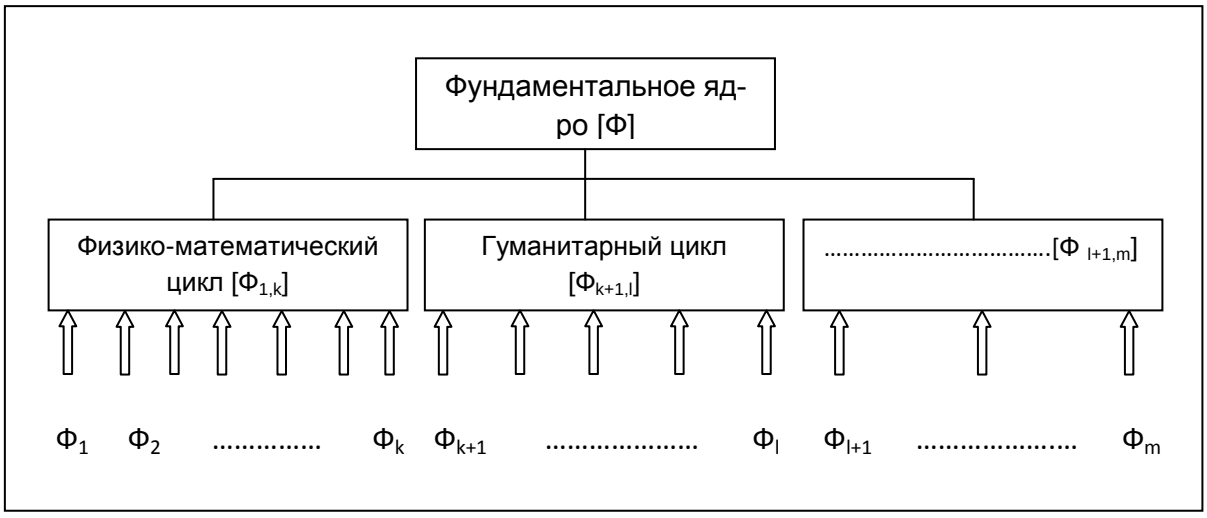


Рис. 3. Структура фундаментального ядра

Существуют подходы к решению задач при нечеткой информации. Из них можно выделить два основных. Первый это добиться максимальной четкости информации. Этот путь мало подходит к оценке фундаментальности образования в условиях демократичного общества, т.к. неизвестно где найти такого «пророка», с мнением которого все бы согласились. Следуя второму пути, нужно отказаться от четкого описания в задачах принятия решений и на основе теории нечетких множеств разработать аппарат, позволяющий извлекать из нечеткого описания правило выбора альтернатив. Этот путь ведет нас к постоянной дискуссии на разных уровнях. Это мы и делаем, но только эпизодически.

Известный термин, что высшая школа должна быть в достаточной мере консервативной, уже не является абсолютно верным для столь динамичного развития науки и скорости пополнения знаний, которое наблюдается в 21 веке. Поэтому не надо бояться слишком частого возвращения к обсуждению вопроса о фундаментальности образования. Правильно отмечается, что «большое значение имеет широкое обсуждение содержания фундаментального ядра в научном и педагогическом сообществах [10]».

Надо извлекать из этого процесса полезные выводы для конкретной коррекции образования. Министерство науки и образования предписывает преподавателям проводить ежегодное обновление программ учебных дисциплин. Это должно касаться и дисциплин, которые создают фундаментальное образование в ВУЗе.

Высшее образование несет в себе профессиональную и социальную направленность. В настоящее время со стороны обучающихся наблюдается снижение интереса к профессиональной части образования. Успешно работая параллельно с обучением, студенты убеждаются в невостребованности многого из того чему их учат. В тоже время они заинтересованы в социальном лифтинге, который предоставляет им высшее образование. Отсюда отношение к обучению, как к неизбежности для получения диплома при минимальной заинтересованности. Осознание полученного уровня образования приходит с годами. Поэтому так важна в процессе обучения информация о положительных карьерных успехах выпускников вуза. Успехам, к которым привело их именно фундаментальное образование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Н. Фундаментальное образование [Электронный ресурс] // http://nikaan.livejournal.com/132901.html (дата обращения: 13.01.2013).
2. Садовничий В. А. Традиции и современность // Высшее образование в России. 2003. №1.
3. Манушин Э. А. Взаимосвязь фундаментальных и прикладных аспектов образовательного процесса [Электронный ресурс] // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование», № 10, октябрь 2012 http://technomag.edu.ru/doc/467932.html (дата обращения: 14.01.2013).
4. Речинский А.В., Ватин Н.И., Гамаюнова О.С., Усанова К.Ю. Фундаментальность и политехничность строительного образования при использовании Moodle [Электронный ресурс] // Интернет-журнал "Строительство уникальных зданий и сооружений", 2012, №2, с.6-17. http://unistroy.spb.ru/index_2012_02/2_moodle.pdf (дата обращения: 15.01.2013).
5. Аксенов Л.Б. Подготовка машиностроителей: фундаментальность и компетентность, реальность и виртуальность // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. / Под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 14 – 16.

6. Тестов В. А. Фундаментальность образования: современные подходы, 2007 [Электронный ресурс] //: http://portalus.ru (дата обращения: 15.01.2013).
7. Аксенов Л.Б. Системный подход – современная методология проектирования в машиностроении // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы Международной научно-практической конференции. 14-15 июня 2011 года, Санкт-Петербург.- СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2011. – С.9-11.
8. Фундаментальное ядро содержания общего образования / Рос. акад. наук, Рос. акад. образования; под ред.В. В. Козлова, А. М. Кондакова. — 4-е изд., дораб. —М. : Просвещение, 2011. — 79 с.
9. Борель Э. – Вероятность и достоверность. М.: Наука, 1969. – 112 с.
10. Zadeh, L. A., Fuzzy sets. Information and Control, Vol. 8, pp. 338–353. (1965).

УДК 004.02: 514.18

Е.Л. Альшакова

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДИКИ ОБУЧЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА



Елена Леонидовна Альшакова, к.т.н., доцент
Юго-Западный государственный университет
Россия, Курск
Тел.: (4712) 50-45-70, E-mail: alshakova_el@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются инновационные методики обучения конструкторско-технологической подготовке производства в учебной дисциплине «Инженерная графика», внедренные в учебный процесс в Юго-Западном государственном университете. Представлены примеры выполнения графических работ. Данные методики позволяют готовить конкурентоспособных специалистов, эффективно применяющих современные 3D технологии проектирования для решения инженерных задач.

Ключевые слова: инженерная графика, учебная дисциплина, конструкторско-технологическая подготовка производства, CAD система, 3D технологии проектирования, цифровая модель изделия.

E.L. Alshakova

INNOVATION TECHNIQUES OF TRAINING TO DESIGN-TECHNOLOGICAL PREPARATION OF MANUFACTURE

Dr. Elena L. Alshakova, Ass. Prof.
Southwest State University, Kursk, Russia
Phone: 471-250-4570, E-mail: alshakova_el@mail.ru

Abstract

Are considered innovation techniques of training to design-technological preparation of manufacture in educational discipline «Engineering graphics», introduced in educational process at Southwest state university. The examples of performance of graphic works are submitted. The given techniques allow to prepare the competitive experts effectively using modern 3D technologies of designing for the decision of engineering tasks.

Key words: engineering graphics, educational discipline, design-technological preparation of manufacture, CAD system, 3D technology of designing, digital model of a product.

Технологические процессы современного машиностроения и промышленного проектирования непосредственно связаны с применением автоматизированных систем, включающих аппаратные и программные средства, направленные как на решение задач инженерной деятельности, так и на управление производством. В настоящее время применяются PLM/PDM процессы для управления жизненным циклом изделия и управления данными, CAD/CAM/CAE системы, как элементы общего процесса, которые реализуют 3D цифровое проектирование, когда с 3D моделью интегрируется вся необходимая информация изделия, а также позволяют выполнять расчеты, создавать управляющие программы для станков с ЧПУ [1].

В таких условиях необходимо готовить конкурентоспособных специалистов, эффективно применяющих автоматизированные системы (программные продукты) и 3D технологии проектирования для решения задач в области своей профессиональной деятельности.

Предлагается применение в учебном процессе дисциплины «Инженерная графика» методик, рассматриваемых в данной статье, позволяющих студентам по окончанию обучения, помимо возможности чтения и выполнения конструкторской рабочей документации, получить навыки работы с CAD системой, 3D технологиями проектирования и средствами автоматизации выполнения конструкторской документации, инструментами выполнения инженерных расчетов, визуализации и анимации изделия [2].

Федеральные государственные образовательные стандарты высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) третьего поколения по направлениям подготовки (специальностям) содержат учебную дисциплину «Инженерная графика», которая проводится на первом курсе обучения и служит основой для изучения других общеинженерных и профессиональных дисциплин. В связи с переходом на уровневую систему обучения в высшей школе, количество часов аудиторной нагрузки на изучение дисциплины в соответствии с данными стандартами сокращено.

Возникает задача изменить традиционные методы обучения дисциплине «Инженерная графика»: разработать и внедрить в учебный процесс дисциплины «Инженерная графика» методику обучения с применением CAD системы и 3D технологий проектирования, средств автоматизации выполнения 2D чертежей. Необходимо разработать методическое обеспечение дисциплины, задействовав известные в педагогике методы обучения для формирования методических указаний и учебного пособия. Требуется откорректировать содержание дисциплины по часам аудиторной нагрузки (лекций, лабораторных или практических занятий) и самостоятельной работы студентов. Изменить содержание графических работ, например, вне-

дрять работы с применением инженерных инструментов, позволяющих автоматически выполнить расчет, генерировать проектируемые элементы или компоненты изделия, библиотеки стандартных компонентов. Совершенствовать формы текущего и итогового контроля полученных знаний.

В курсе «Инженерная графика» в большинстве случаев графические работы выполняются на бумаге, с помощью чертежных инструментов, при оформлении расчетно-графических, курсовых работ в курсах инженерной графики, компьютерной графики, деталей машин и др. могут использоваться 2D технологии построения чертежа. В данных курсах не используются 3D технологии проектирования, обеспечивающие параметризацию, реалистичную наглядность изделия, включая анимацию и динамический анализ, автоматизацию инженерных и конструкторских работ.

Кроме того, в соответствии с требованиями современного производства, в учебный процесс дисциплин необходимо внедрять параллельное проектирование, командную работу, например, выполнение цифровой 3D модели сборочной единицы по чертежу общего вида, рабочей документации (для одного студента это выполнить сложно), работу в едином информационном пространстве с эффективным управлением данными изделия [3].

В рамках предлагаемых методик, параллельное проектирование и командная работа осуществляются при применении программного продукта Autodesk Inventor, в котором реализована технология цифровых прототипов. [4, 5]. Разработка изделия ведется от построения эскизов, создания на их основе 3D моделей деталей, узлов сборки, расчетов элементов конструкций, визуализации и анимации изделия, далее – оформление рабочей документации в рамках единого процесса проектирования, причем, 2D чертежи и 3D данные хранятся в единой цифровой модели [6]. Для управления проектными данными, необходимыми для производства и всех этапов жизненного цикла изделия, используется система управления данными Autodesk Vault, встроенная в программу Autodesk Inventor. Кроме того, при работе в Autodesk Inventor возможен обмен данными с AutoCAD, AutoCAD Electrical. Модели Autodesk Inventor открываются программными продуктами (CAM/CAE), которые позволяют выполнять расчеты, создавать управляющие программы для станков с ЧПУ. При выполнении графических работ используются библиотека стандартных ГОСТ компонентов, содержащая крепежные изделия (болты, винты, шпильки, гайки, шайбы, шпонки, шлицы), детали трубопроводов, вала и др.; инженерные инструменты (генераторы зубчатых зацеплений, валов, болтового соединения, шпоночного, шлицевого соединения).

Работа по внедрению в учебный процесс дисциплины «Инженерная графика» систем автоматизации проектирования (CAD систем, программных продуктов) ведется с 1997 года. Первоначально графические работы, запланированные в рабочей программе дисциплины «Инженерная графика», выполнялись студентами с помощью 2D технологий проектирования в

системе AutoCAD. Использовались возможности AutoCAD по автоматизации выполнения чертежей путем создания 3D модели детали [7], но широкого распространения не получили, т.к. команды AutoCAD по созданию рабочих чертежей по 3D модели для студентов были сложны. В настоящее время студентам показывается работа в AutoCAD, как с использованием 2D технологий проектирования, так и 3D моделирования. Сравнивая работу и возможности AutoCAD и Autodesk Inventor, студенты отдают предпочтение Autodesk Inventor, т.к. сокращается ручной труд, количество ошибок при выполнении графических работ. Например, в проекционном черчении программа Autodesk Inventor позволяет построить виды и разрезы практически без ошибок, связанных с пространственным мышлением, изометрическую проекцию с вырезом 1/4 части за несколько секунд, сокращается время выполнения графической работы.

С целью подготовить студентов к эффективной работе в Autodesk Inventor, изучаются интерфейс программы, создание 3D моделей деталей с помощью инструментов твердотельного моделирования, инструменты по созданию 2D чертежей на основе 3D моделей, работа с библиотекой компонентов, инженерные инструменты. В рамках учебного процесса дисциплины рассматривается оформление рабочей документации по ГОСТ ЕСКД [8]. Для соответствия ГОСТ ЕСКД можно использовать настройки ГОСТ Autodesk Inventor, установленные по умолчанию. Кроме того, можно осуществить настройки стилей и стандартов в соответствии с требованиями ГОСТ ЕСКД, сохранить шаблон, содержащий требуемые настройки.

Выполняются следующие графические работы.

Графическая работа «Построение изображений»:

1) Простые разрезы. По двум заданным проекциям модели детали, создается 3D модель (рис. 1). Выполняется 2D чертеж детали, содержащий три вида, простые вертикальные разрезы, размеры. Выполняется изометрическая проекция детали с вырезом 1/4 части (рис. 2).

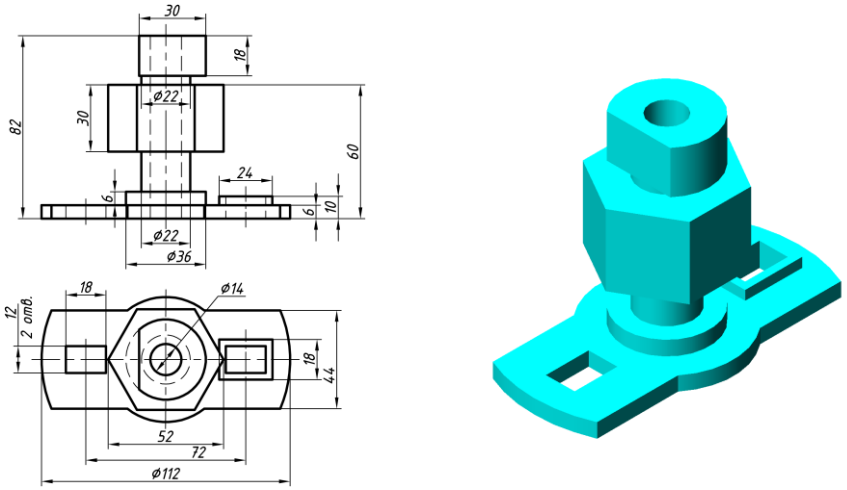


Рис. 1

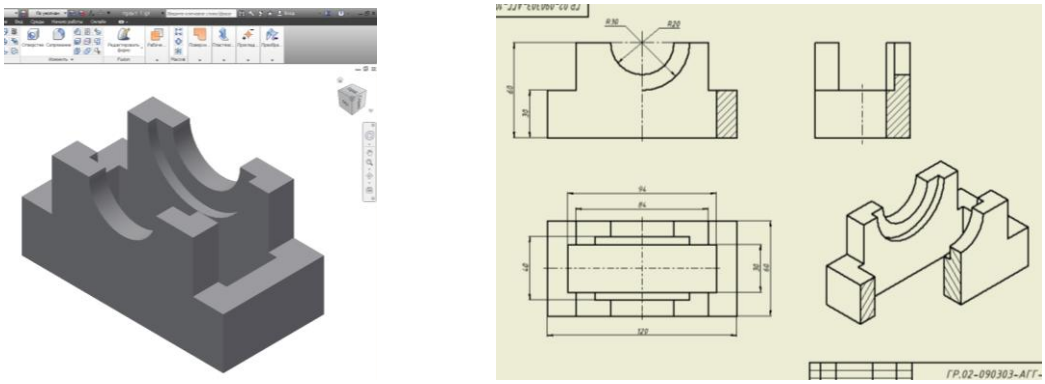


Рис. 2

2) Сложные разрезы. По двум заданным проекциям модели детали, создается 3D модель. Выполняется чертеж детали, содержащий сложный ступенчатый разрез, размеры и обозначение разреза. Аналогично выполняется сложный ломаный разрез.

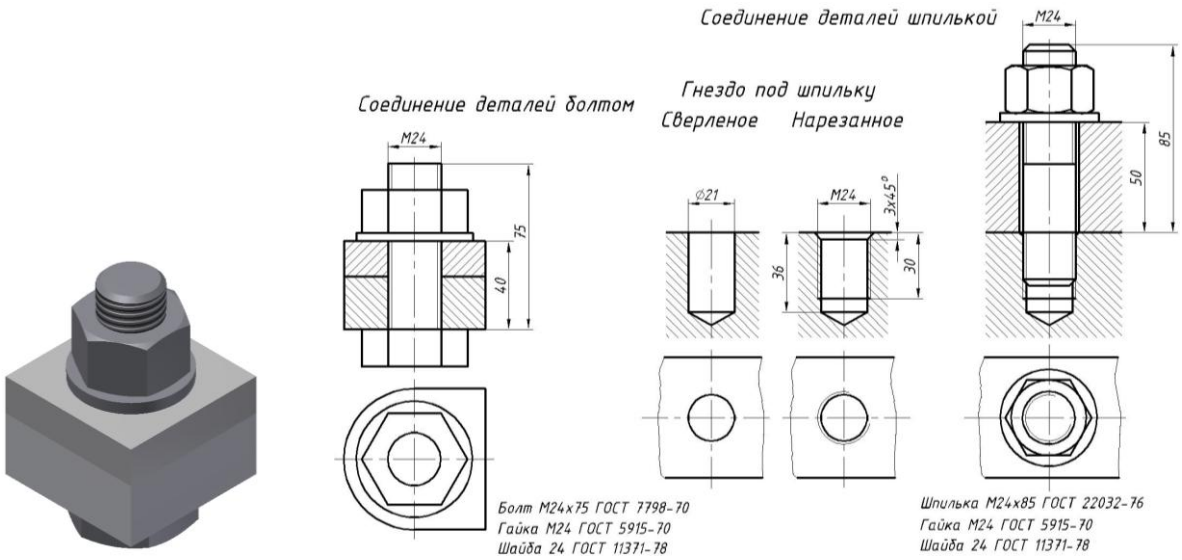
3) Чертеж машиностроительной детали. Задана более сложная деталь: две проекции. Создается 3D модель детали. Выполняется чертеж детали, содержащий три вида, необходимые разрезы, которые назначаются студентами самостоятельно, наносятся размеры. Выполняется изометрическая проекция детали с вырезом 1/4 части.

Графическая работа «Разъемные соединения». Рассматриваются типы соединений (разъемные и неразъемные) [9]. Выполняются 3D модели болтового соединения (рис. 3а), соединений деталей шпилькой, трубного соединения, шпоночного соединения, шлицевого соединения. Используется Библиотека компонентов ГОСТ Autodesk Inventor: вместо того чтобы создавать 3D модели болтов, гаек, шайб, шпилек и т.д., студенты выбирают их из библиотеки. В соединяемых деталях предварительно выполняются отверстия. Под существующее отверстие выбранный крепеж меняет размер. Для размещения болта (винта, шпильки) в отверстии достаточно выбрать требуемый по ГОСТ болт в библиотеке, указать кромку отверстия детали, чтобы болт изменил диаметр по диаметру отверстия, установить длину болта в соответствии с глубиной отверстия или толщиной соединяемых деталей и разместить крепеж в сборке.

Для выполнения болтового соединения в Autodesk Inventor можно использовать Генератор проектирования болтовых соединений. В диалоговом окне выбирается тип соединения (насквозь, глухое отверстие с резьбой), размещение, которое указывается выбором элементов скрепляемых деталей на экране, тип и диаметр резьбы, выбираются, соответствующие стандарту, болт, шайба и гайка из списка в окне, устанавливается длина болта. Требуемые отверстия, в том числе с резьбой, добавляется автоматически, что сокращает время проектирования.

Выполняется 2D чертежи соединений. Рассматривается возможность включить в один чертеж изображения: виды, разрезы из разных файлов 3D моделей. Следует обратить внимание на соответствие полученных черте-

жей соединений требованиям ГОСТ на условные изображения и упрощения на чертежах (рис. 3б). Возможно редактирование чертежа в AutoCAD.

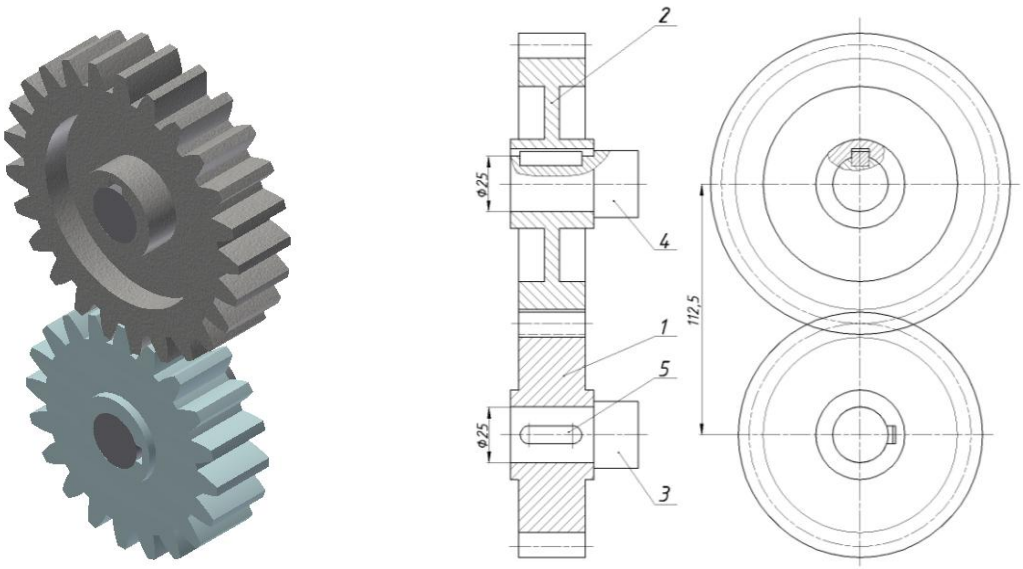


а) б)

Рис. 3

Графическая работа «Эскизы деталей». Эскизы зубчатого колеса, вала, литой детали можно выполнить в программе Autodesk SketchBook Designer.

Графическая работа «Сборочный чертеж». Традиционно графическая работа «Сборочный чертеж» содержит расчет основных параметров зубчатой цилиндрической передачи по заданным модулю, числу зубьев шестерни и колеса, диаметрам валов шестерни и колеса. Выполняется чертеж цилиндрической зубчатой передачи (рис. 4б). Заполняется спецификация. В Autodesk Inventor создаются детали валов с помощью Генератора вала и зубчатые колеса при применении инструментов твердотельного моделирования. Создается сборка при помощи инструментов зависимости, затем 3D модель зубчатой цилиндрической передачи с помощью Генератора зубчатых зацеплений и Генератора шпоночного соединения. В диалоговом окне «Генератор компонентов зубчатых колес» можно задать характеристики зуба в зацеплении, осуществить выбор модели, в данном случае устанавливаются модуль и количество зубьев, ширина венца для колес, межосевое расстояние, параметры зацепления. После нажатия кнопки «Рассчитать», рассчитываются параметры цилиндрической зубчатой передачи, обновляется изображение с добавлением элементов колес. В диалоговом окне отображаются ошибки проектирования. Зубчатые колеса моделируются автоматически (рис. 4а). Моделировать зубчатые колеса с созданием зуба, а затем массива не требуется. Имеется возможность проектировать коническую или червячную передачу. Выполняется 2D чертеж, который редактируется в AutoCAD с целью соответствия ГОСТ 2.402-68 на условные изображения зубчатых передач и зубчатых колес (рис. 4б).



а) б)

Рис. 4

Графическая работа «Деталирование чертежа общего вида». Выполнение рабочих чертежей деталей по чертежу общего вида. Выполнение сборочного чертежа, спецификации [9]. По чертежу общего вида в Autodesk Inventor выполняются 3D модели указанных деталей (все детали, входящие в состав сборочной единицы). По 3D моделям выполняются рабочие чертежи указанных деталей [10, 11]. Студенты имеют возможность создать сборку изделия (рис. 5), выполнить анимацию.

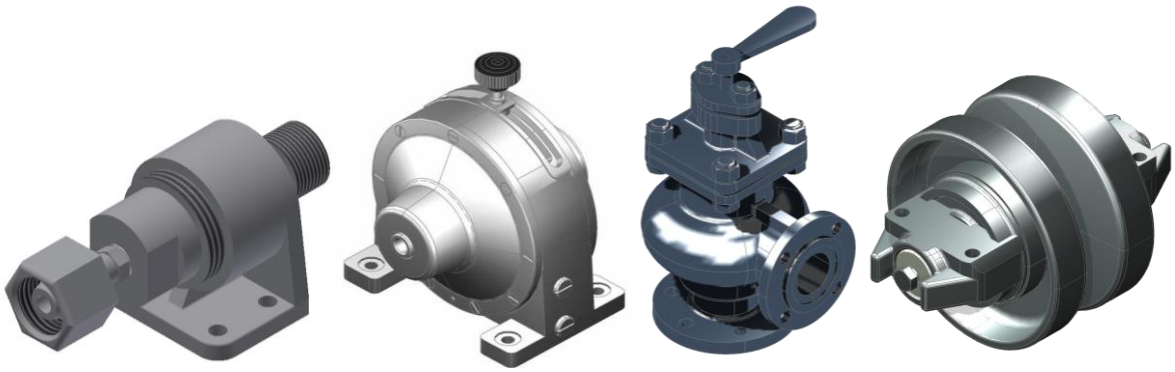


Рис. 5

Методические материалы.

С целью организации лабораторных работ и самостоятельной работы студентов в учебном процессе дисциплины «Инженерная графика» разработаны методические указания. В связи с ограниченным количеством часов, отводимых на изучение дисциплины, обучение эффективной работе в Autodesk Inventor ведется параллельно с изучением основных разделов дисциплины «Инженерная графика», стандартов на выполнение и оформление конструкторской документации. Студенты имеют возможность выполнить графические работы с помощью программы Autodesk Inventor, используя разобранные примеры. Для каждой графической работы преду-

смотрены индивидуальные задания. В методических указаниях уделяется внимание соответствию изображений, создаваемых с помощью инструментов Autodesk Inventor, ГОСТам системы ЕСКД на оформление конструкторской документации.

Содержание методических указаний определяется различными методами обучения. Репродуктивный метод обучения обеспечивает выработку у студентов умений и навыков применения знаний по образцу или в сходной ситуации (в отличие от творческого применения). В методических указаниях, раскрывающих этот метод, приводится хорошо разобранный пример решения задачи, студент выполняет его, воспроизводя профессиональный стиль и методы решения. В дальнейшем студент имеет возможность решать сходные задачи.

Процесс решения задачи должен быть хорошо и подробно рассмотрен, чтобы студент получил представление о том, как решает задачу профессионал (в этом случае удобно использовать видео уроки).

В рассматриваемом примере решение задачи показано по шагам (стадиям, этапам) выполнения задачи, для того чтобы студенты различного уровня подготовки могли понять и самостоятельно выполнить все этапы решения данной задачи.

После каждого шага приводится эталон получаемого результата, для того чтобы студент мог сравнить собственный результат выполнения какого-либо шага с эталоном решения и сделать выводы о правильности своих действий. С целью экономии времени студента пример составлен так, чтобы студенту не пришлось обращаться за дополнительной информацией в справочную литературу или к преподавателю. Рассматривается один законченный пример решения задачи. Студент должен получить конечный продукт, например, 3D модель детали и чертеж.

Таким образом, дидактическая сущность репродуктивного метода состоит в том, что в методических указаниях конструируется задание на воспроизведение знаний и действий уже известных и осознанных студентами благодаря лекциям и учебной литературе [6, 8, 9]. Студенты, выполняя это задание, вырабатывают у себя соответствующие умения и навыки.

Репродуктивный метод очень экономичен во времени, но в то же время не гарантирует развития творческих способностей студентов. С этой целью предлагается использовать исследовательский метод обучения, который можно применить при изучении всех учебных дисциплин. Но этот метод не может занимать значительного места в учебном процессе – в силу своей длительности.

Сущность исследовательского метода можно определить как способ организации поисковой, творческой деятельности студентов по решению новых для них проблем. Здесь проблема решается самим студентом, а методические указания выступают как организатор поисковой деятельности (задание на самостоятельную работу, ссылки на литературу и др.).

Данный метод призван обеспечить творческое применение знаний, умений и навыков, а также овладение методами научного познания, формирование опыта творческой деятельности.

В методических указаниях приводятся дополнительные задачи, помеченные символом «*». В соответствии с данным методом студент должен сам найти метод решения такой задачи. В качестве поощрения студенты, выполнившие данные задачи, получают премиальные баллы от преподавателя при использовании балльно-рейтинговой системы оценки качества обучения, что важно при выставлении зачета и оценки на экзамене.

Для решения дополнительных задач требуется материал, выходящий за рамки методических указаний. Студент должен самостоятельно найти решение задачи, читая соответствующую литературу, пользуясь справочной информацией, полученными знаниями и навыками профессиональной работы. Здесь может быть полезен интернет для изучения учебных материалов, он-лайн уроков, обмена проектными данными.

Таким образом, разработанные методические указания содержат:

- теоретический материал;
- разобранный пример решения комплексной задачи;
- основные варианты заданий;
- дополнительные варианты заданий;
- справочную информацию со ссылками;
- вопросы для самопроверки;
- список используемой литературы.

В качестве полученных результатов можно отметить, что студенты первого курса, изучающие дисциплину «Инженерная графика» по данным методикам, имеют возможность успешно участвовать в научных конференциях и конкурсах по 3D моделированию и компьютерной графике. В 2013 году студенты первого курса приняли участие в ежегодном региональном молодежном конкурсе «Трехмерное моделирование», проводимом в Юго-Западном государственном университете (г. Курск), во Всероссийской студенческой олимпиаде по технологиям Autodesk, проводимой в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е.Алексеева (г. Нижний Новгород), в Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения XXXIX», которая ежегодно проходит в МАТИ-РГТУ им. К.Э.Циолковского (г. Москва).

Применение предложенных методик дает возможность студентам на первом курсе приобрести навыки работы с программными продуктами по 3D проектированию и в дальнейшем использовать их при выполнении курсовых, выпускной и дипломной работ.

Реализуются основные принципы ИПИ технологий: работа в едином информационном пространстве, использование библиотек ГОСТ компонентов, организация параллельной работы (с этой целью в Autodesk Inventor используются проекты и встроенная система Vault).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М.В.Жаров. Жизненный цикл изделия и информационная поддержка изделия на всех этапах этого цикла // Применение ИПИ – технологий в производстве: труды десятой Всерос. науч.-практ. конференции. – М.: МАТИ, 2011. – С. 14 – 18.
2. Е.Л.Альшакова. Современные технологии проектирования в учебном процессе общеинженерных дисциплин // Высшая школа и студенчество сегодня: материалы Всерос. научн. конференции. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2012. – С. 57 – 62.
3. В.Н.Юрин. Компьютерный инжиниринг в инженерном образовании: этапы развития//Новые материалы и технологии – НМТ-2012: материалы Всерос. науч.-техн. конференции.– М.: МАТИ, 2012.– С. 378– 380.
4. Е.Л.Альшакова. Параллельное проектирование в машиностроении на примере Autodesk Inventor // Применение ИПИ – технологий в производстве: труды десятой Всерос. науч.-практ. конференции. – М.: МАТИ, 2012. – С. 104 – 105.
5. Е.Л.Альшакова. Процесс командного взаимодействия при проектировании в машиностроении // Новые материалы и технологии – НМТ-2012: материалы Всерос. науч.-техн. конференции. – М.: МАТИ, 2012. – С. 368 – 369.
6. Тремблей Т. Autodesk Inventor 2012 и Inventor LT 2012. Официальный учебный курс / Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 352 с.
7. Е.Л.Альшакова. Использование трехмерного моделирования при выполнении чертежей в курсах инженерной и компьютерной графики // Сборник трудов 2-ей Всерос. науч.-метод. конференции по инженерной геометрии и компьютерной графике. – М.: МИТХТ, 2009. – С. 24 – 29.
8. Начертательная геометрия. Инженерная и компьютерная графика: учебник: в 3 т. Т.1: Начертательная геометрия, геометрическое и проекционное черчение / П.Н. Учаев [и др.]; под ред. П.Н. Учаева и В.И. Якунина. – Курск. гос. тех. ун-т. Издательский центр «Академия», 2008. – 344 с.
9. Начертательная геометрия. Инженерная и компьютерная графика: учебник: в 3 т. Т.2: Машиностроительное черчение / П.Н. Учаев [и др.]; под ред. П.Н. Учаева и В.И. Якунина, – Курск. гос. тех. ун-т. Издательский центр «Академия», 2008. – 344 с.
10. Е.Л.Альшакова. Компьютерные технологии при преподавании графических дисциплин // Научные труды. Вып. 18 (90). – М.: МАТИ, 2011. – С. 324 – 328.
11. Е.Л.Альшакова. Применение информационных технологий в учебном процессе на кафедре начертательной геометрии и инженерной графики // Геометрия и графика: сборник научных трудов. Выпуск 1. – М.: МИТХТ, 2011. – С. 61 – 68.

УДК 378.149:514

И.Б. Афанасьева, Л.И. Димент, О.В. Меркулова

ДИДАКТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГРАФИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН В ФОРМИРОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ СТУДЕНТОВ



Ирина Борисовна Афанасьева, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: afanaseva.mmf@mail.ru



Лев Иосифович Димент, к.т.н., доцент, доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: kpgd@mail.ru



Ольга Васильевна Меркулова, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: kpgd@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены теоретические и методические основы формирования пространственных представлений студентов в обучении. Представлены дидактические возможности графических дисциплин и совокупность педагогических условий для формирования пространственного интеллекта как разновидности образного мышления.

Ключевые слова: пространственные представления, мышление, учебная деятельность, совокупность педагогических условий, дидактические возможности, графика

I.B.Afanaseva[1], L.I.Diment[1], O.V.Merkulova[1]

DIDACTIC POSSIBILITIES OF GRAPHICS IN FORMATION OF STUDENTS SPATIAL REPRESENTATIONS

[1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper describes theoretical and methodical basis of formation of space factor in training. There are presented the didactic possibilities of graphics and stage of pedagogical conditions to formation of spatial intelligence as a variety of creative thinking.

Key words: spatial representation, thinking, educational activity, stage of pedagogical conditions, didactic possibilities, graphics

Высшее образование, в современных условиях необходимости постоянного самосовершенствования специалистов, направлено на формирование профессионально-активной личности, обладающей целостной системой знаний и практико-ориентированных методов в своей области деятельности. Поэтому на систему образования возлагается большая ответственность за организацию образовательного процесса, обеспечивающего личностное, деятельностное и интеллектуальное развитие учащихся (И.А.Зимняя, В.В.Сериков, В.И.Панов, Ю.Г.Фокин, М.А.Холодная, А.В.Хуторской и др.).

Овладение системой научных знаний, эффективная работа во многих видах теоретической и практической деятельности человека неразрывно связаны умением оперировать пространственными образами, т.е. с развитыми интеллектуальными умениями [1,2].

Согласно Л.Терстоуну, пространственные способности или пространственный интеллект, пространственный фактор (space factor) являются способностью оперировать мысленными пространственными образами, схемами, моделями реальности. Он включает в себя два подфактора: скорость и точность распознавания двухмерных объектов; мысленное вращение и преобразование образов в трехмерном пространстве. М.А.Холодная рассматривает интеллект как общую когнитивную способность [8]. В.В.Дружининым, в результате анализа соотношений между вербальным (смысловым), пространственным и знаково-символическим факторами в структуре интеллекта, был сделан вывод о наличии последовательности их формирования. На основе вербального интеллекта, связанного с усвоением языка, складывается пространственный интеллект, последним по времени проявляется формальный (или знаково-символический) интеллект [4].

Пространственный интеллект рассматривается учеными как необъемлемая часть математического мышления, математических способностей. Изучению этих способностей посвящены труды математиков А.Н.Колмогорова, А.Д.Александрова и др., психологов А.Бине, Ж.Пиаже, С.Л.Рубинштейна, М.А.Холодной, И.С.Якиманской, педагогов-геометров Г.Д.Глейзера, В.А.Гусева, Э.Г.Гельфман, В.А.Далингера и др.

В современных условиях компетентностной парадигмы высшего профессионального образования, традиционные цели дисциплин геометро-графического цикла - развитие пространственного мышления, творческих способностей к анализу и синтезу пространственных форм и отношений на основе графических отображений, приобретение знаний и умений геометрического моделирования – актуальны и сегодня [7].

В психологии уже давно признано, что необходимым компонентом творческой деятельности в различных областях теории и практики является воображение, обеспечивающее создание новых образов, на основе тех, которыми человек уже владеет. Психологический анализ деятельности инженеров-конструкторов, изобретателей, художников, представленный в трудах Б.Ф.Ломова, показал, что в выполнении их профессиональной деятельности существенную роль играет умение оперировать с пространственными представлениями, т.е. пространственное воображение.

Решающим фактором в осуществлении творческой деятельности ученые признают произвольное воображение. Оно выступает как умение оперировать образами, как система умственных действий (П.Я.Гальперин, Б.Ф.Ломов и др.). По словам А.Н.Колмогорова, геометрическое воображение (геометрическая интуиция) играет большую роль в исследованиях, причем независимо от раздела математики.

Исследование педагогических условий для развития пространственного интеллекта, формирования пространственных представлений студентов и школьников средствами геометро-графических дисциплин представлено в фундаментальных трудах Б.Ф.Ломова, А.Д.Ботвинникова, Н.Ф.Четверухина, а также в работах И.А.Ройтмана, В.Н.Виноградова, В.В.Степаковой, А.А.Чекмарева, Н.Н.Зепновой и др.

Три основные категории знаний о пространстве (о форме, протяженности, направлении) учащиеся получают еще в школе. Формирующиеся на их основе различение и представление учащихся об отдельных предметных и геометрических формах, о величине как протяженности по высоте, длине и ширине и направлениях по сторонам своего тела являются простейшими пространственными представлениями.

К сложным пространственным представлениям (образующимся на основе синтеза) относятся: синтез различных пространственных соотношений между собой, связь их с количественным или временным представлением; все представления, связанные с изучением метрических мер и определением пропорций; геометрические, географические, топографические и т.п. представления.

Формирование простых и сложных пространственных представлений в процессе обучения требует создания определенных условий в педагогическом процессе:

- накопление учащимися разнообразного опыта различения пространственных признаков и отношений;

- приобретение учащимися знаний о пространстве в единстве с практикой различения тех или иных пространственных признаков и отношений;
- накопление учащимися опыта в произвольном использовании пространственных представлений в мыслительной деятельности при решении различного рода задач.

К сожалению, указанные условия не всегда обеспечиваются в педагогическом процессе, что отрицательно сказывается на развитии пространственных представлений у школьников. В результате они сталкиваются с большими трудностями при изучении дисциплин геометро-графического цикла в техническом вузе [1,2].

Психологические закономерности развития пространственных отношений и связей

По мнению Б.Ф.Ломова, формирующую роль в развитии пространственного воображения играет опыт чувственного первосигнального анализа и синтеза пространственных особенностей предмета, накапливаемый в процессе выполнения практической деятельности [6].

Исследовав пути формирования пространственного интеллекта личности, ученые выделили ступени развития пространственных отношений, характеризующихся следующими показателями [4,6,8]:

1) *Уровень различения* (дифференцированность пространственных признаков и отношений – общее развитие пространственных представлений).

   В восприятии учащиеся узнают и различают признаки, но словесно не отождествляют. Таким образом, образуется разрыв между образом и словом, который отражает неполноту взаимодействия между первой и второй сигнальными системами. Использование терминов для определения пространственных отношений требует определенной стимуляции, поскольку учащиеся затрудняются объяснить свои действия. Необходимы специальные вопросы, примеры или другие побуждения к поискам словесных выражений и грамотному применению терминов.
2) *Уровень использования* словесного обозначения пространственных признаков и отношений (устанавливается полное соответствие между представлением и значением слова, учащиеся начинают активно пользоваться словесными выражениями пространственных отношений).
3) *Уровень синтеза и связи* пространственных отношений и количественными и временными представлениями.
4) *Уровень включения* самого пространственного представления в мыслительную деятельность учащихся.

Согласно концепции Б.Ф.Ломова, представление является обобщенными целостным образом, в котором зафиксировано соотношение «конструктивных элементов» объекта. Редукция компонентов этого образа является как бы «оборотной стороной» обобщения, его необходимым следст-

вием [6]. Практические действия играют формирующую роль в развитии пространственного воображения не потому, что, выполняя их, человек начинает все более точно их представлять, а потому, что практические действия обеспечивают тонкий чувственный анализ особенностей объекта действия и его изменений в процессе манипулирования, т.е. обеспечивают формирование структурированного и дифференцированного *образа.*

В познавательной деятельности личности познание и мышление непрерывно переходят одно в другое и взаимно обусловливают друг друга. Таким образом, наглядно-действенное и наглядно-образное мышление являются базой для формирования практического и наглядно-чувственного опыта. На их основании развивается отвлеченное мышление, которое становится фундаментом для формирования мышления в форме абстрактных понятий [4]. Само умственное действие в пространственном воображении выступает как обобщенный способ преобразования представлений. Субъект может деформировать, расчленять образ, комбинировать заново части, не представляя того конкретного способа, которым это выполняется практически. Разумеется, такой обобщенный способ формируется в *опыте практической деятельности*.

Специфические черты геометро-графических дисциплин определяют их особое положение в ряду базисных направлений развития личности. Учет психологических особенностей пространственных представлений учащихся и закономерностей их развития может качественно обогатить методику обучения и позволить более правильно и в короткие сроки решить различные практические задачи [1].

Дидактические возможности содержания образования в формировании пространственных представлений

В педагогике выделяют т.н. «сквозные» отрасли содержания ВПО – «это последовательно развивающиеся во времени отрасли, которые, говоря образно, пронизывают все этапы образования» [5, с.29].

К данным отраслям относят общее, специальное и политехническое образование, содержание которого заложено в общетехнических дисциплинах общепрофессионального цикла. В.С.Леднев считает, что к числу «сквозных» можно отнести дисциплины, связанные с формированием интеллектуальных и творческих качеств личности (в т.ч. учебное проектирование, исследовательские работы и пр.).

Также «сквозными» могут быть компоненты образования, связанные с «формированием важных свойств личности, соответствующих наиболее общим элементам структуры деятельности» [5, с.33]. На основе важных свойств личности и формируются интеллектуальные, коммуникативные и профессиональные компетенции, с характерной для них рефлективно-аксиологической составляющей.

В структуре ВПО дисциплины геометро-графического цикла могут рассматриваться как «сквозные», что определяет интегративные возможности содержания начертательной геометрии, инженерной графики и позволяет рассматривать их как средство формирования пространственных представлений студентов. Формирование пространственных представлений возможно в педагогическом процессе: *целостном* по своему содержанию, организационным формам и методам; *структурированном* с учетом специфики не только собственно дисциплин, но и специфики усвоения знаний, умений, навыков, развития мышления, формирования интеллектуальных умений, пространственных представлений и т.п.

Обогащение умственного опыта учащихся пространственными образами различных видов, а также развитие способности к конструированию пространственного образа является одной из важнейших задач и необходимой предпосылкой успешного обучения начертательной геометрии и инженерной графике. Поскольку в процессе зрительного восприятия отчетливо проявляются индивидуальные особенности развития пространственных представлений учащихся - одни легко схватывают общую форму предметов, другие лучше видят его части, то дифференцированные графические задания создают условия для более напряженной тренировки пространственных представлений студентов.

Методика обучения основам проекционного моделирования основана на отказе от опоры на наглядные изображения при выполнении графических работ. Задачей преподавателя является обучение студентов сознательному приему мысленного представления объекта в проекциях (до изображения на чертеже, эпюре), т.е. обучение учащихся созданию *образа воображения.* С этой целью разработана специальная методика обучения, которая предусматривает объяснение студентам принципа проецирования с использованием наглядных средств: визуальных моделей, трехгранного угла, изображений плоскостей проекций при помощи электронных средств или на доске – с постепенным отказом от них и заменой реальных действий мысленными. В результате это приводит к тому, что расчлененные во времени действия объединяются в единый акт и осуществляется полный переход к непосредственному представлению проекций и оперированию ими. Таким образом, схематически процесс формирования навыков выполнения эпюра требует: от преподавателя – показа приема, подведения его к осознанию, обучения мысленному составлению проекций и организации переноса; от студентов – усвоения показанного приема, его осознания, умственного выполнения, что приводит в итоге к автоматизации приема. Надо отметить, что здесь также наблюдается переход от «внешних» действий к мысленным, но сами «внешние» действия иные – они базируются не на манипуляциях с каким-либо предметом, а на принципиальных основах метода проекций, и утверждается необходимость оперирования представлениями. В этом процессе можно отметить большую роль ди-

намического момента пространственного воображения, поскольку именно эта сторона пространственного представления наиболее затруднительна для учащихся [3].

Оценить уровень сформированности пространственных представлений студентов в обучении возможно, если использовать специально структурированные учебные задания проблемно-познавательного характера. Поскольку формирование пространственного интеллекта как разновидности образного мышления особо чувствительно к технологиям, формам, средствам и методам обучения, то такой метод контроля является универсальным. Он может быть применим на разных уровнях сформированности пространственных представлений в обучении как начертательной геометрии, так и инженерной графике.

Совокупность педагогических условий для формирования пространственных представлений

В течение нескольких лет на кафедре инженерной графики и дизайна авторами проводилась опытно-экспериментальная работа, в ходе которой проверялась гипотеза: способствует ли изучение курса начертательной геометрии формированию пространственных представлений студентов? В эксперименте приняли участие студенты ММФ, ЭнМФ (47 чел.), изучавшие начертательную геометрию в первом семестре, и студенты ИМОП, ФМедФ (42 чел.), которые начали обучение с инженерной графики.

Для определения степени сформированности пространственных представлений нами была использована методика Б.Ф.Ломова, по которой участникам эксперимента предлагалось произвести ментальные действия с плоскими геометрическими фигурами (мысленно сложить, свернуть, разрезать, развернуть), далее – зарисовать на бумаге получившийся мысленный объект. Индикаторами являлись правильность изображения и скорость проведения ментальных пространственных преобразований.

Проведенное исследование подтвердило гипотезу: по степени сформированности пространственных представлений показатели студентов машиностроительных специальностей в целом оказались выше (высокий, средний и низкий уровень), у студентов немашиностроительных специальностей – средний и низкий уровень.

В результате анализа теоретической, научно-методической и психолого-педагогической литературы, а также на основании психолого-педагогического анализа учебной деятельности участников эксперимента и собственного педагогического опыта, мы пришли к следующему выводу: для эффективного формирования пространственных представлений студентов в обучении необходимо обеспечение совокупности педагогических условий:

1) многоуровневость содержания учебной деятельности: разные аспекты учебной информации должны быть ориентированы на различные типы познавательного опыта учащихся, а также на различные компоненты в структуре познавательного опыта каждого студента [1,2,8];
2) учет психологических особенностей пространственных представлений учащихся и закономерностей их развития; учет когнитивно-стилевых особенностей студентов в обучении [1,4,8];
3) поскольку формирование пространственных представлений должно осуществляться в неразрывной связи с изучением содержания дисциплин, необходимы разработка и применение системы дидактического обеспечения, реализующей поставленную задачу средствами учебных дисциплин; учебная информация и формы ее предъявления должны иметь четкую направленность на определенные модальности ментального опыта личности [8,9];
4) в условиях ФГОС ВПО, при сокращении часов на изучение дисциплин геометро-графического цикла, в частности, начертательной геометрии, считаем крайне важной интенсификацию обучения (как инновационными, так и традиционными средствами) и углубленную подготовку студентов именно в области теории поверхностей и геометрических преобразований.

В качестве заключения отметим, что пространственные представления как разновидность образного мышления обеспечивают создание не только образов объектов, но и системы образов, и оперирование ими в процессе решения задач. Умение мыслить в этих системах и характеризует пространственный интеллект индивидуума.

Формирование пространственных представлений обеспечивается средствами учебных дисциплин (начертательной геометрией, математикой), средствами геометрического моделирования (прикладной геометрией, инженерной и компьютерной графикой), далее развивается и совершенствуется в освоении специальных дисциплин проектно-конструкторского цикла. Таким образом, обогащение интеллектуального ресурса личности умениями оперировать пространственными образами отвечает задаче высшего профессионального образования - воспитанию высокоинтеллектуального, творческого, а значит, и конкурентоспособного специалиста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева И.Б. Формирование интеллектуальных умений в обучении [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ: научный журнал, серия «Наука и образование» /СпбГПУ.-СПб. 2010.№4 (110).С.349-356.
2. Афанасьева И.Б. Формирование пространственных представлений в обучении [Текст] /Фундаментальные исследования и инновации в

технических университетах: Материалы XШ Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. СПб, 13 мая 2009. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2009. – С.203-204.
3. Ботвинников А.Д.. О нерешенных вопросах в теории и практике обучения основам проецирования [Текст] / Обучение основам проецирования. Пособие для учителей (из опыта работы). Сост. А.Д.Ботвинников. – М.: Просвещение, 1975. 191 с.
4. Дружинин В.Н.. Психология общих способностей [Текст]. – СПб.: Питер, 2000. – 368 с.
5. Леднев В.С. Содержание образования: сущность, структура, перспективы [Текст]. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1991. – 224 с.
6. Ломов Б.Ф. Опыт экспериментального исследования пространственного воображения [Текст]/В кн.: Проблемы восприятия пространства и пространственных представлений. – М., 1961. С. 158-162.
7. Покровская М.В. Инженерная графика: панорамный взгляд (научно-педагогическое исследование) [Текст]. М.: Изд-во: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 1999. – 137 с.
8. Холодная М.А. Психология интеллекта. Парадоксы исследований [Текст]. – СПб.: Питер, 2002. – 272 с.
9. Хуторской А.В. Современная дидактика. [Текст]. СПб.: Питер, 2001. – 544 с.

УДК 378:514

И.Б. Афанасьева, Е.В. Князева

ЛИЧНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ОБУЧЕНИЕ В СИСТЕМЕ НЕПРЕРЫВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ШКОЛА-ВУЗ»



Ирина Борисовна Афанасьева, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: afanaseva.mmf@mail.ru



Елена Валерьевна Князева, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: evk1503@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены теоретические и методические аспекты личностно-ориентированного обучения. Представлены авторские технологии обучения начертательной геометрии и инженерной графике в системе непрерывного образования “школа-вуз».

Ключевые слова: личностно-ориентированное обучение, непрерывное образование, система «школа-вуз», графика, начертательная геометрия.

I.B.Afanaseva, E.V. Knyazeva

PERSONALITY-ORIENTED EDUCATION INTO CONTINUOUS EDUCATION OF SCHOOL-UNIVERSITY SYSTEM

Irina B.Afanaseva[1], e-mail: afanaseva.mmf@mail.ru;
Elena V. Knyazeva[1], e-mail: evk1503@gmail.com.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

The paper describes theoretical and methodical basis of personality-oriented training. Authors’ technologies of training in descriptive geometry and graphics of continuous education in school-university system are considered.

Key words: personality-oriented training, continuous education, school-university system, graphics, descriptive geometry.

Современный этап развития страны характеризуется коренными изменениями во всех структурах общества, особенно значительными в системе отечественного образования. Отличительными особенностями системы образования XXI века являются направленность на свободное развитие личности, ориентация на самоактуализацию и самостоятельность в учебно-познавательной деятельности.

Таким образом, сегодня перед вузами стоит задача - обеспечить подготовку грамотных специалистов, адаптированных к условиям современного производства и различного рода профессиональной деятельности. На первый план выдвигаются задачи гибкого изменения и индивидуализации содержания образования при сохранении его фундаментальности, активизация учащихся в учебно-познавательной деятельности и развитие личностно-значимых качеств в процессе обучения.

Направленность на личность в педагогическом процессе потребовала замены традиционного обучения (субъект-объектного взаимодействия) на личностно-ориентированное обучение, т.е. на субъект-субъектное взаимодействие, которое требует организации образовательного процесса, обеспечивающего условия для развития способности к самообразованию, самоопределению и самореализации в профессиональной деятельности всех субъектов.

Теоретические аспекты личностно-ориентированного обучения

Психолого-педагогические и психологические аспекты личностно-ориентированного обучения рассматриваются в работах М.А.Акоповой, Е.В.Бондаревской, В.И.Загвязинского, В.В.Серикова, М.А.Холодной, А.В.Хуторского, И.С.Якиманской и др. Необходимость и возможность развития такого обучения исследователи обосновывают гуманистическим пониманием процесса образования как творческого взаимодействия всех субъектов в образовательном процессе.

Основные теоретические положения личностно-ориентированного образования можно сформулировать следующим образом:

1. Развитие личности обучающегося рассматривается как главная цель - личность становится системообразующим началом в педагогическом процессе. Данный подход преобразует обучающегося из объекта педагогических воздействий в субъекта образовательного процесса, а это предполагает личностную активность в самообучении и самовоспитании. Таким образом, стирается грань между результатами обучения и воспитания, их различие определяется лишь на уровне содержания и конкретных технологий обучения.

2. Ориентация на индивидуальную траекторию развития личности приводит к изменению нормативных требований к результатам образования, выраженных в государственных стандартных образования. В резуль-

тате изменяются требования к самоопределению, самообразованию, самостоятельности личности в учебно-познавательной деятельности; при усилении личностного компонента образования возрастает значение соблюдения требований стандартов.

3. Залогом полноценной организации образовательного процесса становятся авторские педагогические технологии и творческая индивидуальность преподавателя. Принципиально важным является положение о том, что образование, ориентированное на личность, создает условия для полноценного развития всех субъектов образовательного процесса [5].

Содержание личностно-ориентированного обучения должно иметь все необходимые человеку компоненты для развития собственной личности, включая следующие:

- *аксиологический компонент*, который способствует выбору личностно- значимой системы ценностных ориентаций учащегося;
- *деятельностно-творческий компонент*, который способствует формированию и развитию у обучаемых творческих способностей, оригинальных подходов к решению задач, необходимых для самореализации личности в познании и профессиональной деятельности;
- *когнитивный компонент*, обеспечивающий учащегося научными знаниями о человеке, культуре, истории, природе как основе духовного развития;
- *личностный компонент*, обеспечивающий познание себя, развитие рефлексивной способности, овладение способами саморегуляции, самосовершенствования, нравственного и жизненного самоопределения, формирующий личностную позицию [1].

Одним из путей, позволяющих реализовать методологический принцип личностно-ориентированного образования, сделав обучаемого субъектом учения, учесть его потребности, мотивы, цели, способности, активность, интеллект и другие индивидуально-психологические особенности, является внедрение в образовательный процесс современных педагогических технологий [2,4,7]. При этом разработка образовательных технологий должна базироваться на результатах исследований о психологических механизмах развития личности с учетом вариативности обучения, направленного на расширение возможностей саморазвития и профессионального самоопределения. Именно это определяет смену образовательной парадигмы – переход от формирования личности с заданными свойствами к разработке теории образования как личностно-ориентированного педагогического процесса.

В связи с модернизацией российской системы образования проблема целостности образовательного процесса становится особенно актуальной. Непрерывное образование имеет многоступенчатую структуру, где все компоненты тесно взаимосвязаны. В современных педагогических теориях отмечается, что концепция непрерывного образования основывается на

объективных, необходимых, существенных и повторяющихся связях, которые отражают закономерность педагогического процесса развития, а принцип преемственности позволяет осуществлять эти содержательные связи. С другой стороны, принципы и правила организации непрерывного образования определяются объективными закономерностями [5].

В современных условиях все большее значение приобретает совершенствование системы «школа-вуз». Это образовательная структура, направленная на реализацию концепций непрерывного образования, учитывающих принципы фундаментальности, преемственности, гибкости, при совокупности принципов всеобщего образования и его индивидуализации. Постоянное взаимодействие образовательных учреждений не только позволяет реализовать идею «обучения всю жизнь», но дает возможность учащимся получить основы фундаментальных знаний высшей школы при организации дополнительного профильного обучения.

Под дополнительным профильным обучением мы рассматриваем следующие организационно-педагогические модели обучения:

- Профильные классы, такие как физико-математический, экономический, экологический, химико-биологический и др.
- Профильные группы, позволяющие реализовать более гибкую систему обучения, регулировать содержание и объем учебного материала в зависимости от индивидуальных возможностей каждого учащегося.
- Многопрофильное обучение, обеспечивающее учащемуся индивидуальный выбор элективных курсов, предлагаемых учебным заведением.
- Профильные учебные заведения: лицеи, гимназии, в том числе созданные на базе вузов, например, естественно - научный лицей на базе СПбГПУ.

Графическая подготовка учащихся в системе непрерывного обучения «школа-вуз»

Современные государственные стандарты четко регламентируют количество учебных часов, отводимых под графические дисциплины. Высшая школа сегодня сталкиваемся с тем, что уровень графической подготовки абитуриентов падает с каждым годом, например, в 2011 году число студентов, не имеющих графической подготовки, составило 60%, [10], в 2012 – 68% (рис. 1).

Это связано прежде всего с тем, что графические дисциплины либо вообще отсутствуют в школьной программе, либо преподаются на очень низком уровне из-за нехватки квалифицированных педагогов именно в этой области [8].

До 2005 года в учебной программе школьного курса существовал учебный предмет «Черчение». На занятиях учащиеся изучали правила построения и оформления чертежей, осваивали основы конструирования, что способствовало развитию пространственного воображения. В настоящее время предмет «Черчение» не предусмотрен как самостоятельная дисциплина. В примерных программах по учебному предмету «Технология» в разделе «Технологии обработки конструкционных материалов» предусматривается освоение материала: основы черчения, графики и дизайна [10]. Для большинства первокурсников технических университетов недостаток знаний в области геометро-графических дисциплин является ощутимым препятствием при обучении в вузе.

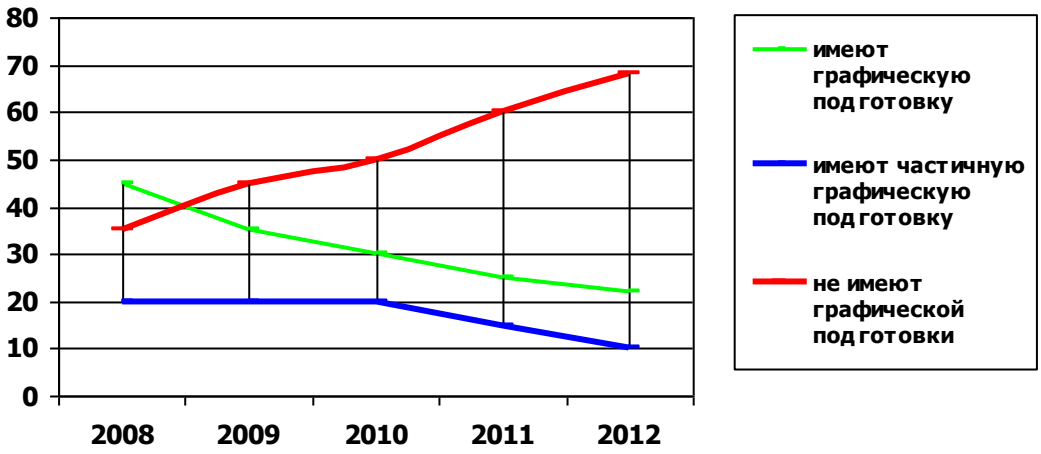


Рис.1.

На наш взгляд, только дополнительное профильное обучение способно обеспечить соответствующую графическую подготовку, предотвратив появление проблем у абитуриентов в обучении графическим (геометро-графическим и художественно-графическим) дисциплинам.

В качестве примера эффективности взаимодействия системы «школа-вуз» мы предлагаем к рассмотрению реализацию концепций личностно-ориентированного обучения в разработке авторских педагогических технологий обучению циклу графических дисциплин.

Включение личностных качеств преподавателя в процесс проектирования образования состояло в специальном конструировании авторами содержания учебной дисциплины в контексте организации личностно-ориентированного образования [2,7].

Результатом деятельности в этом направлении стала разработка педагогических технологий. Основные положения технологий обучения определяли:

- реализация смысла деятельности, рефлексия и самостоятельность в учебном процессе;
- в организационно-методическом плане - групповая учебная

деятельность в режиме диалога, обучающей дискуссии, совместного поиска решения поставленной проблемы и стратегий решения учебных задач разного типа, введение заданий эвристического, когнитивного типа и пр.

- в учебно-методическом плане - выполнение индивидуальных творческих заданий, в том числе открытого типа, проблемных и поисковых.

Деятельностно-творческий характер обучения определялся направленностью на поддержку индивидуального развития учащегося, предоставления ему необходимой свободы для принятия самостоятельных решений при выборе содержания и способов учения. Эти требования обладают свойством универсальности, они могут быть применены к любой технологии. В свою очередь, любая технология может стать личностно ориентированной, если будет отвечать этим требованиям.

В течение 6 лет группы профильного обучения из учащихся 10-11 классов общеобразовательной школы №71 Калининского района СПб изучали элективный курс графической подготовки «Инженерная графика» (педагогическая технология в разработке Е.В.Князевой). В основу курса была положена лекционная и практическая часть заданий дисциплины «Начертательная геометрия. Инженерная графика», разработанная на кафедре «Прикладная геометрия и дизайн» СПбГПУ для студентов инженерно-технических факультетов. Курс был адаптирован в зависимости от индивидуальных потребностей учащихся, одна часть которых планировала поступление в вуз на инженерно-техническое направление, другая часть - на художественно-творческое направление (дизайн, архитектура, реставрация и др.). Он включает два структурно и методически согласованных раздела: «Начертательная геометрия», «Начертательная геометрия и технический рисунок» - 10 классы; «Инженерная графика» - 11 классы.

В процессе обучения учащиеся получали как теоретические, так и практические знания, а также познакомились с вузовской методикой обучения: ведение конспекта лекций, создание портфолио, отражающего успехи каждого учащегося и др. На занятиях большое внимание уделялось индивидуальной работе с учащимися. Практические задания были составлены в виде комплекса уровневых заданий в последовательности от «простого к сложному». И ориентированы на индивидуальные особенности учащихся (скорость переработки информации, темпы восприятия и обучения, склад мышления, творческие способности и т.п.). Это позволило каждому работать в своем темпе, последовательно переходя на разные уровни сложности. Наиболее успешные учащиеся принимали участие в районных и городских олимпиадах по черчению и занимали призовые места [8,9,10].

В естественнонаучном лицее СПбГПУ проводится обучение основам проекционного моделирования в рамках учебного предмета «Технология

(конструирование и дизайн)» в 10 и 11 классах. В образовательный процесс ЕНЛ внедрена личностно-ориентированная технология обучения с учетом когнитивно-типологических особенностей учащихся в разработке И.Б.Афанасьевой. Для актуализации интеллектуального потенциала учащихся автором разработана система вариативного дидактического обеспечения, одни элементы которой соответствуют основным когнитивным стилям студентов и служат основанием для обеспечения комфортного режима умственного труда, другие – не соответствуют и, тем самым, призваны развивать гибкость интеллектуального поведения учащихся. Внедрение в практику обучения указанной системы дидактического обеспечения адаптирует учебный процесс к индивидуально-типологическим особенностям учащихся и позволяет оптимизировать индивидуальное обучение субъекта в сотрудничестве с другими участниками процесса учебной деятельности. Методические приемы для выполнения задач обучения лежат в области организации образовательной среды [2,3,4].

В 2012 году 4 учащихся 11-х классов ЕНЛ принимали участие в олимпиаде СПбГПУ по начертательной геометрии среди студентов первых курсов инженерно-технических специальностей, где показали достойные результаты. Полученный запас знаний, умений и навыков позволяет студентам из числа лицеистов с легкостью справляться с вузовской нагрузкой по начертательной геометрии и инженерной графике.

Заключение

Анализ исследований по проблематике профильного обучения показал, что учащиеся школ, в которых созданы профильные классы и обучение проводят преподаватели вузов, демонстрируют наиболее позитивную динамику обучения уже на 1 курсе. Студенты в большем объеме усваивают материал, легче адаптируются к требованиям университетской программы, затрачивают меньше времени на обучение, досрочно получают зачеты и сдают экзамены [6,7,8].

Многие из студентов отмечают актуальность подготовки по элективным курсам, как геометро-графическим, так и художественно-графическим. Знания, умения и навыки по инженерной графике, полученные в школе помогают быстро сориентироваться на занятиях в вузе и успешно заниматься в дальнейшем.

В заключение отметим, что обеспечение должного уровня графической подготовки выпускников - несомненная задача школы, однако ее решение возможно только в тесном взаимодействии педагогов школы и преподавателей вузов. На наш взгляд, из сложившейся ситуации возможны следующие пути выхода:

- На государственном уровне – создание учебных заведений на базе вузов (есть положительные примеры – ЕНЛ СПбГПУ, лицей при СПбГЭТУ, лицей при СПбГУ и др.).
- На организацонном уровне – создание профильных классов, введение элективных курсов в учебную программу школ для подготовки в вузы.
- Привлечение преподавателей вузов к работе в школах, что позволит учащимся ознакомиться с учебным процессом, приближенным к вузовской программе, в том числе с ведением конспекта лекций, выполнением индивидуальных заданий, выполнением курсовых работ, освоением новой терминологии, стандартных требования по оформлению и подаче материала, созданием портфолио, отражающего успехи каждого учащегося.
- Внедрение личностно-ориентированного обучения графическим дисциплинам и соответствующих технологий в учебный процесс школы.

Проведенные опросы и анкетирование преподавательского состава школ и абитуриентов показали, что они отмечают значимость элективных курсов в профильном обучении, особенно в старших классах, но не хватает педагогических кадров, способных реализовывать данное обучение на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акопова, М.А. Личностно-ориентированное профессиональное обучение в техническом вузе. [Текст] /М.А.Акопова // Научно-технические ведомости СПбГПУ: научный журнал, серия «Наука и образование»/ СПбГПУ.-СПб., 2003.-№ 4 (34).-С.213-220.
2. Афанасьева, И.Б. Учет когнитивно-стилевых особенностей студентов в обучении [Текст] / И.Б.Афанасьева// Известия РГПУ им.А.И.Герцена: научный журнал/ РГПУ. –СПб, 2009. - № 105. – С.60-65.
3. Афанасьева, И.Б. Формирование интеллектуальных умений в обучении начертательной геометрии [Текст] /И.Б.Афанасьева // Научно-технические ведомости СПбГПУ: научный журнал, серия «Наука и образование»/ СПбГПУ.-СПб., 2010.-№ 4 (110).-С.349-356.
4. Афанасьева, И.Б. Формирование пространственных представлений в обучении [Текст]/ И.Б.Афанасьева//Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: материалы ХП Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы/СПбГПУ.-СПб., 2009.-С.203-204.
5. Зеер, Э.Ф. Психология профессий: Уч.пособие.- Екатеринбург: Изд-во УГППУ, 1997. -224 с.

6. Современное образование: содержание, технологии, качество. Материалы XVIII Международной научно-методической конференции. СПбГЭТУ. 18 апреля 2012.Т 2. – СПб: СПбГЭТУ, 2012.- 258 с.
7. Князева Е.В. Проектная деятельность преподавателя в процессе изучения инженерно-графических дисциплин. // Психология, коммерция, дизайн: актуальные проблемы подготовки специалистов: Сборник научных трудов №1. – СПб: НИУД, 2008. – С.32–35.
8. Князева Е.В. Организация допрофесиональной подготовки в системе школа-вуз на примере курса «Инженерная графика» //Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах. Тезисы докладов XIII всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы – СПб: СПбГПУ, 2009. Ч.2 – С.215–216.
9. Князева Е.В. Формирование графической культуры у студентов-дизайнеров в техническом вузе// Проблемы математической и естественно - научной подготовки в инженерном образовании. сб.тр. Международной научно-методической конференции, 11-12 ноября 2010г./ Под общ.ред. В.А. Ходаковского.- СПб: ПГУПС, 2011.- 269с.- С.145-155.
10. Князева Е.В. Разработка курса «Начертательная геометрия и технический рисунок» для студентов-дизайнеров в техническом университете./ Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Международной научно-практическая конференции / Под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С.82-90.

УДК 74.01/.09

Е.П. Бояшова

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ВОСПИТАНИЯ ЭСТЕТИЧЕСКОГО ВКУСА У СТУДЕНТОВ, ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ДИЗАЙН»



Елена Петровна Бояшова**,** член Союза художников России, доцент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Санкт-Петербург, 195251, Россия. Тел. (812)5527514, E-mail: helen.glass@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматриваются некоторые аспекты воспитания эстетического вкуса у студентов, обучающихся по специальности «Дизайн»: воспитательная значимость предметного окружения человека, личность преподавателя как эстетическая система, определение критериев оценки работы студента.

Ключевые слова: промышленный дизайн, художественный вкус, определение вкуса, конкурентоспособность продукта, личность преподавателя.

FORMATION OF INFORMATION CULTURE OF STUDENTS IN THE STUDY OF PROFESSIONAL DISCIPLINES

Helen P. Boyashova, St. Petersburg Polytechnical University, Russia, e-mail: helen.glass@mail.ru

Abstract

This article is devoted to some aspects of education for aesthetic taste of the students, studying on the speciality «Design»: educational significance of the subject-human environment, the identity of a teacher as an aesthetic system, definition of estimation criteria of student work.

*Keywords:*Industrial design, artistic taste, the definition of taste, the competitiveness of the product, the identity of a teacher.

Часто наши преподаватели на обходах по рисунку, живописи и проектированию сталкиваются с такими «произведениями» студентов, которые вызывают не то, чтобы эстетическое отторжение, но некоторую неприязнь при взгляде на эти работы. Вердикт, по общему мнению, такой: «В этой

работе не хватает вкуса». Но сформулировать критерии, по которым можно было бы точно определить наличие «хорошего вкуса», оказалось не так просто. Как правило, такие работы выполняются студентом самостоятельно, в свободное от аудиторных занятий время. Автор приложил немало усилий для того, чтобы выразить свою индивидуальность в полной мере, сообразно своим представлениям о том, что такое «красиво - некрасиво», вложил свою душу, наполнил содержанием, своими переживаниями, или наоборот – поддался процессу созидания как развлечению. Но преследовал все-таки одну цель - выразить себя в полной мере. Преподаватели в этом случае чувствуют некоторую растерянность в сложившейся ситуации, непросто давать объяснения по поводу неприятия выполненной работы, потому как «наше самолюбие больше страдает, когда порицают наши вкусы, чем когда осуждают наши взгляды» (Ф. де Ларошфуко). Но какой аргумент может привести преподаватель на железный довод: «Почему Вам не нравится? Маме (папе) показывал, ей (ему) понравилось, сказали, что очень красиво». Мнение родителей для этого обучающегося представляется более авторитетным, чем опыт преподавателя. Это понятно, ему хочется быть самим собой, ни на кого не похожим, он вырвался из стен школы в почти взрослую жизнь и будет утверждаться и самовыражаться так, как он считает нужным. В этом случае студент пользуется предыдущим опытом восприятия: на вызывающе яркое наши начинающие дизайнеры могут реагировать как на эталон красоты (детский опыт восприятия, что называется «глаз не оторвать»). На формирование вкусовых предпочтений также влияют бытовое окружение, условия развития личности, общественное влияние, уровень культуры (возможность посещения музеев и выставок) и насколько хорошо владеет культурой графического исполнения сам студент. Результат самовыражения получается строго противоположным: его индивидуальность растворяется в безликой массе других самовыражающихся «индивидуальностей», похожих друг на друга как две капли воды.

Преподаватели понимают степень ответственности за воспитание эстетического вкуса в стенах высшей школы, назначение вуза в том и состоит, чтобы развивать те или иные способности студента на высшем уровне. При наличии вкуса любая практическая изобразительная деятельность будет служить одним из критериев успешности образовательного процесса. Формирование социальной характеристики личности, в том числе эстетического вкуса происходит в период с 13 до 20 лет, и если учесть, что к нам приходят семнадцати-восемнадцатилетние студенты, то нашей задачей становится воспитание вкуса как инструмента создания уникальной личности, способной к осознанному отбору эстетических ценностей. Потому как студенты, получив квалификацию дизайнера по специальности «Промышленный дизайн», будут сами участвовать в формировании вкусов будущего общества. «Культура, созданная человеком, является материаль-

ным носителем форм мышления и форм созерцания…» [1] и напрямую зависит от того, как усвоил студент язык искусства и дизайна.

Обратимся к словарям, чтобы дать определение такому понятию как вкус. Философский словарь «художественный вкус» определяет как «вырабатываемая общественной практикой способность эмоционально оценивать различные эстетические свойства, прежде всего, отличать красивое, прекрасное от безобразного, отвратительного» [3, с. 73]. В то время как словарь по мировой художественной культуре характеризует вкус как «способность человека к критическому суждению, пониманию и эстетической оценке явлений жизни» [4, с. 66 – 67]. Отсюда можно сделать вывод, что понимание вкуса простирается от эстетически-эмоционального восприятия до разумно-критического суждения об увиденном. Вкус можно рассматривать как совокупность эмоций и рассудка, но это дает широкое поле для интерпретаций самого понятия. Проблема определения вкуса возникает в силу размытости и неточности определения самого понятия, учитывая, что способность человека оценивать накопившийся опыт зависит опять же от влияния окружающего мира, от индивидуальной чувствительности восприятия каждого человека. Согласно проведенным опросам наших студентов, что же такое «хороший вкус», большинство из них ответили, что это «чувство меры, простота и гармония, интуиция». При ближайшем рассмотрении этих высказываний можно увидеть, что чувство меры, а тем более интуиция у всех разные: кому избыточность барочного орнамента покажется уместной, кому минималистическое решение интерьера достаточно наполненным. Если рассматривать вкус как субъективные предпочтения, то можно оправдать такое явление как китч. Можно ли ориентироваться на некий эстетический идеал, приемлемый и общепризнанный для всех людей (для каждой эпохи, национальной традиции)? Кратковременное господство, массовое увлечение неким идеалом будет называться модой в отдельно взятой общности людей. Как трудно определить этот идеал в наше время, отмеченное быстротечностью перемен и колоссальными объемами появления новой информации, с инсталляциями и перфоменсами вместо выставок произведений искусства. Можно согласиться с мнением Л.Н. Безмоздина о том, что «дурной вкус потому и дурной, что стереотипен и только. Он не допускает вариаций за пределами стереотипа. Человеку нужны социальные и культурные стереотипы и нормы, но жить только в их пределах он не может»[2]. Задача дизайнера – постоянно обновлять существующие стереотипы для повышения конкурентоспособности своего продукта. И здесь нельзя игнорировать вкусовые предпочтения целевых групп покупателей. В итоге, мы вернулись к тому, с чего начали. Мало того, что студенты имеют расплывчатое понимание вкуса, уважаемые словари и справочники не дают однозначных и четких определений. С другой стороны, работать в рамках стереотипа не так предосудительно, согласно «эстетике тождества» (по Ю.М. Лотману), до 90 %

всех эстетических систем как раз подразумевают достаточно строгое следование канону (древнерусское искусство, подражание античности – классицизм, фольклорные системы). Важность умения работать в разных эстетических системах неоспорима для студента. Такой метод работы как рисование с натуры и копирование произведений художников с мировым именем учит понимать и отражать наиболее характерные и типичные явления жизни, затем студенты учатся обобщать полученные знания на практических занятиях. Только овладев языком искусства и правилами грамотного изображения можно обрести индивидуальность, хотя это не дает, как ни парадоксально звучит, гарантии обретения «хорошего вкуса» в исполнении своих работ. Хороший вкус требует знаний нескольких наук, он проявляется как индивидуальная форма эстетического сознания каждого человека. Чувство прекрасного можно развить у каждого, творческие способности к изобразительному искусству являются результатом развития задатков.

С нашей стороны, прежде, чем выдать творческое задание, важно определить, в какой эстетической системе будет работать студент. То есть, поставить задачу и определить критерии, по каким будет оцениваться данная работа (целостность, функция предмета, создание образа и т.д.). Критерий «маме и папе понравилось» в данном конкретном случае учитываться не будет. Правила и требования, четко сформулированные преподавателем, в рамках которого разрешается творить, подскажут студенту выбрать наилучшие способы выполнения заданий. В идеале – это должны быть уже изученные и освоенные студентом эстетические системы, и как следствие желательность прохождения курса истории искусства на начальном этапе обучения, до появления творческих заданий в процессе обучения. Если творческое задание появилось до истории искусства, на основе минимального опыта познания в изобразительной деятельности, то в некоторых случаях можно с оговорками признать критерий «маме понравилось» действующим (в этом случае потребуется социологический опрос родителей, соседей, организация выставок и презентаций для данного контингента зрителей и проч.). Все это выглядит спорным, но вариант такого решения проблемы определения вкусовых предпочтений возможен.

Знакомство с общепринятыми образцами «хорошего вкуса» позволяет студенту сравнивать, выявлять достоинства и признаки «хорошего вкуса». Здесь может служить примером Британская школа дизайна в Москве, со своим ответственным подходом к собственным интерьерам. Также строгая архитектура здания, в котором мы занимаемся, удивительная история политехнического университета, представленная в нашем историко - техническом музее в полной мере помогают нашим студентам прочувствовать и оценить деятельность человека как создателя предметного мира и имеет большую воспитательную значимость.

Личность преподавателя также является эстетической системой, и, как правило системой более высокого уровня (или более сложной структурой) в своей профессиональной области, чем мама и соседи. Тем не менее, требования к выполнению работ, по которым создается данное произведение в данной системе, должны быть четко сформулированы. Неясность требований преподавателя ведет к непониманию студентами задания, непродуктивной и невостребованной работе. Обвинения студента в несоответствии требованиям должны быть строго аргументированы. Правила выполнения работ должны быть установлены как для учебных, так и для творческих заданий. Особенно это касается творческих работ, которые исполнители понимают как «вседозволенность» и неизбирательность в средствах и выборе темы. Абсолютной свободы быть не может, такая свобода может привести в лучшем случае к единообразию, в худшем - к хаосу и разрушению, ограничение свободы дает мощный творческий импульс исполнителю. При разборе рисунков и живописных работ преподавателями используются такие средства стимулирования как похвала и порицание, пользоваться которыми нужно тонко и осторожно. Особенно стоит похвалить те работы, которые выполнены в рамках требований и имеют ответ на поставленную задачу, с применением творческого подхода.

Существует еще одна возможная проблема – вкусовые предпочтения самого преподавателя, или так называемое «отсутствие вкуса». Как верно заметила в своей статье «Развитие вкуса к познанию как проблема современной высшей школы» Т.Б. Кудряшова: «в проектной деятельности это приводит к различного рода «отклонениям», пристрастиям к определенным формам, к увлечению устаревшим или, наоборот, экстравагантным и не апробированным; к настойчивому повторению одного и того же, или, наоборот, к калейдоскопической смене мнений и взглядов, вызывающих у окружающих смех, досаду или полное равнодушие. С отсутствием вкуса в … научно-технической деятельности связаны такие явления как застой и фанатизм» [3]. Вкусовые пристрастия руководителя действительно могут пагубно сказаться на качестве учебного процесса. Чтобы этого избежать, на наших обходах по рисунку, живописи и проектированию присутствует не менее трех человек, в дополнение к ведущему преподавателю по каждой дисциплине. Преподаватели - действующие художники и дизайнеры, что дает им возможность быть сведущими в своих предметных областях, они могут оценить ту грань знаний студента, которую тот проявил на соответствующих занятиях. Нам представляется важным факт, что все преподаватели имеют различное профессиональное образование, от чисто технического до сугубо гуманитарного, что позволяет им видеть свою проекцию личности студента и его представленных работ. Обсуждения, споры, дебаты взаимно обогащают новым опытом и знаниями каждого из них. Умение слушать и принимать другую точку зрения позволяет свободно оперировать различными формами знания, выбрать практическую уста-

новку для дальнейшего развития личности студента и проявить его лучшие стороны в полной мере. Умению слушать и принимать другую точку зрения, неплохо было бы научить и самих студентов. В качестве такого опыта мы проводим предварительные совместные обсуждения (просмотры) еще незаконченных работ, поощряются конструктивные критические замечания. Результаты коллективного совместного обсуждения полезны как студентам, так и преподавателям. Во-первых, у студента появляется больше материала для дальнейшего совершенствования своей работы. Во-вторых, аргументированная точка зрения студента при обсуждении может учитываться, а иногда должна изменить точку зрения преподавателя.

Таким образом, у студента появится возможность работать не только в разных эстетических системах, но и умение контактировать с представителями других систем, а также аргументировать свою точку зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Безмоздин Л.Н. В мире дизайна. Ташкент: изд-во «ФАН», 1990. С. 164
2 Безмоздин Л.Н.. В мире дизайна. Ташкент: изд-во «ФАН», 1990. С. 168
3 Кудряшова Т.Б. Развитие вкуса к познанию как проблема современной высшей школы. . [Электронный ресурс] // Вестник ИГЭУ. 2005. Вып. 2. С. 15. URL.: http://ispu.ru/files/15-22.pdf .

УДК 74.01/.09

Е.П. Бояшова, В.В. Грязнов

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ТВОРЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ ЛИЧНОСТИ СТУДЕНТОВ-ДИЗАЙНЕРОВ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ОБУЧЕНИЯ



Елена Петровна Бояшова**,** член Союза художников России, доцент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия. Тел. (812)5527514, E-mail: helen.glass@mail.ru



Викентий Вадимович Грязнов**,** ст. преподаватель, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия. Тел. (812)5527514, E-mail: kpgd@mail.ru

Аннотация:

Актуальность данной статьи определяется тем, что дизайн как творческая деятельность, генерирующая новые идеи, зависит от уровня и качества подготовки студентов на начальном этапе обучения. В статье затрагиваются проблемы влияния компьютерных программ трехмерного моделирования на образ мыслей студента.

Ключевые слова: промышленный дизайн, рисунок по представлению, пространственное мышление, творческое сознание, компьютерные программы трехмерного моделирования.

FORMATION OF INFORMATION CULTURE OF STUDENTS IN THE STUDY OF PROFESSIONAL DISCIPLINES

Helen P. Boyashova[1], e-mail: helen.glass@mail.ru;
Vicenty V. Greaznov[1], e-mail: kpgd@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract:

The relevance of this article is determined by the fact that the design of both the creative activity, generating new ideas, depends on the level and quality student’s training at the initial stage of education. In the article the problem of the influence of computer programs of three-dimensional modeling on the way of the student’s braining.

Keywords: Industrial design, drawing on the proposal, spatial thinking, cre-

ative consciousness of computer programs, three-dimensional modeling.

Задача дизайнера состоит в том, чтобы создавать вещи, которые бы отвечали трем основным критериям - быть необходимыми, полезными и быть красивыми. Эти вещи, продукты, услуги являются предметом интереса дизайнера, который по своей натуре должен быть “человеколюбом”. И именно это отличает его от просто художника, который отчасти является эгоистом. Предметы, созданные дизайнером, в идеале призваны обогащать и «освежать» окружающую материальную среду, в которой большую роль играет зрительное и тактильное восприятие человека. Для успешной работы и понимания инструментов своей будущей профессии студентам-дизайнерам на начальном этапе важно овладевать таким навыком изображения, как рисунок по представлению. То есть рисованием из головы, где самым главным является то, что сформировалось в виде нематериальной идеи и требует фиксации на бумаге. В своей профессиональной деятельности дизайнеры создают новые образы знакомых по функциональному признаку вещей, по-новому осмысливают трудности взаимодействия «человек-предмет», и отвечают на них языком создания визуальных образов. Дизайн – это очень творческая деятельность, которая включает в себя знания не только технических характеристик объекта, но и законов зрительного восприятия, тактильного ощущения, а также освоение законов изобразительной грамоты. Упражнения и задания, направленные на освоение рисунка по представлению, формируют у студента готовность к воплощению замысла и уверенность в исполнении графического изображения.

Важность овладения рисунком по представлению актуальна для любого вида художественной деятельности. Художник как создатель единственного и неповторимого произведения по природе своей самодостаточен, и как мы указали ранее эгоистичен. Он осознает свою уникальность. Образы и представления, возникающие в его воображении, могут основываться только на его личном опыте и вкусовых предпочтениях, и зачастую носят событийность характера. Дизайнер в этом случае имеет другую психологическую направленность своих действий - ему важнее комплекс факторов, которые создадут положительный и полезный образ того или иного предмета. Этими факторами могут быть эмоции и чувства пользователя, удобство в применении нового продукта потребителем, систематический поиск новой информации о современных технологиях и материалах как залог новых решений в смене образа привычной вещи. Художник, создавая свое произведение, будет опираться на натуру, изучение и передачу закономерностей природных явлений, свои личные переживания и перипетии окружающей его культуры. Гарантией достоверности служат неизменность восприятия реального мира по отношению к миру изображемому. Мы смотрим на определенное событие, интерпретированное автором, и в нашей памяти остается впечатление подлинности происходящего. Живопис-

цу необходим поиск подходящего материала и типажа; задуманную картину он может создавать на основе зарисовок с натуры – нам знакомо множество историй о судьбе тех, кто позировал художникам, это были реальные люди, но в нашем представлении они навсегда остались участниками тех далеких событий и сами стали для нас историей. Если художник постоянно может обращаться за «советом» к натуре и опираться на конкретные впечатления и образы своей кратковременной памяти, то рисование по представлению отличается тем, что образы представления не конкретны. Они обладают большей степенью обобщенности и неуловимости, чем образы кратковременной памяти. Поэтому рисунок по представлению может быть выполнен только при условии изучения свойств известных нам объектов, умении выделять и подчеркивать ту незыблемо постоянную конструктивную основу формы, выявлении закономерностей строения формы, понимания законов линейной перспективы. Рисунок по представлению не должен и не может быть похож на рисунок, выполненный с натуры. Основное внимание в нем уделяется линейно-конструктивному рисованию, овладеть которым можно только с помощью специальных упражнений: оно дает нам уникальную возможность оперативно откликаться на приходящие в голову мысли и идеи и фиксировать их в графическом исполнении, понятных зрителю. Задача преподавателя в этом случае превратить такие занятия по выполнению рисунков по представлению в увлекательную потребность и дать возможность мыслить ощутимыми образами. Только на основе собственных мечтаний, осмысления настоящего, прогноза будущих предпочтений потребителя можно, увидеть например, образ нового автомобиля или утюга. Без умелого оперирования мысленными образами и владения рисунком по представлению будущий дизайнер не может претендовать на новое слово в дизайне, потому как без этого он будет основываться только на аналоговом методе проектирования.

Занятия академическим рисунком дают неоспоримые знания природных закономерностей и явлений. При академическом рисовании мы проходим этапы анализа закономерностей построения видимых объектов, распределения света и тени на объемах, в голове и памяти студента остаются личные впечатления от увиденного. Выполнение изображений по памяти тренирует краткосрочную и долговременную память рисующего, а также формирует умение додумывать образ и форму для максимально убедительного изображения. Презентабельность в рисунке внушает доверие и заставляет поверить в жизнеспособность заявленного дизайн-продукта.

Когда дизайнер выполняет эскиз, он линиями «ищет» очертания формы, пытается перевести нечеткие, неясные мысли в материальный вид, облекает задуманное в зримый образ. Иногда хаос поисковых линий может навести автора на какие-то новые неожиданные ассоциации, помогает по-новому взглянуть на объект. Чем больше ассоциаций возникает у рисующего, тем большей выразительности он сможет добиться в окончательном

варианте рисунка объекта. Рука двигается по плоскости листа свободно, без ограничений, у дизайнера есть возможность быстро исправить нарисованное, с помощью кальки он может сохранить найденное ценное. Поисковые эскизы представляют нам пусть не оформившийся окончательно, но зримо доступный образ. Но пока не сказано последнее слово и не принято бесповоротное решение в точных линиях, поисковые эскизы могут вызывать у зрителей различные представления, то есть интерпретации, в зависимости от культурного навыка созерцания (понимания) изображения. Всякий может усмотреть в изображении свою сверхиндивидуальную истину. Так преподаватель может увидеть в наброске студента совершенно отличное от автора развитие идеи, каждый из них разглядит в нем что-то свое, но не оформленное в конкретную форму возникшее чувство и представление может привести к недопониманию и разочарованию как с той, так и с другой стороны. Пусть начальный эскиз уводит далеко от первоначальной идеи – это совсем неплохо, – все мысли и поиски останутся на бумаге. Любое проектирование невозможно без цели: кто, где и как будет использовать новый объект, а следовательно, это проектирование не только одиночного предмета, а целой объектной системы. Объект может быть представлен в предполагаемой среде, где возможно присутствие человека на рисунке. При взгляде на изображение можно понять, как работает объект, представить его частью работающей системы. Человек созидающий способен складывать полученную информацию, выделять в ней главное и второстепенное. Также человек способен предвосхитить дальнейшее поведение этой системы. А теперь представим другую ситуацию, когда нужно воплотить свою идею в компьютерной программе 3-D моделирования (графические 2-D программы мы не рассматриваем). Без предварительного эскиза здесь, разумеется, не обойтись. Компьютер – мощный инструмент, но в случае его применения автор будет ограничен как рамками собственных навыков рисования объемных предметов, так и объемом знаний возможностей, предоставляемых программой.

Компьютерные программы 3-D моделирования призваны помочь человеку представить задуманный объект в виде более приближенном к реальности. Дизайнер обязан знать и уметь использовать программы 3-D моделирования, он должен грамотно представить свою идею, но прежде, чем он приступит к окончательному действию – исполнению виртуального трехмерного объекта, его нужно «накормить» знаниями закономерностей в изображении этих трехмерных объектов, перспективы, композиции на листе, теплохолодности цветовой гаммы изображаемых объектов. Если на начальном этапе обучения студента – дизайнера не научили, или же он не научился сам элементарной изобразительной грамоте, не успел развить в себе пространственное мышление на основе специальных заданий, если все эти знания не перешли для него в область «автоматического» навыка и умения, то созданные им вещи в программах 3-D моделирования будут

выглядеть пусть и основательно сделанными, но непривлекательными – сугубо поверхностными. Зачастую получается так, что студент пытается создать новый продукт с помощью компьютерной программы, толком не осознавая, что же он все-таки хочет увидеть в конечном результате, полностью полагаясь лишь на технические возможности программы. В отличие от ручного исполнения, где всегда присутствует недосказанность, возможность для пробуждения ассоциаций, некоторые поверхности лишь подразумеваются, компьютерная картинка выглядит иллюзорно реальнее, законченнее, не допускающей сомнений у зрителя, по сути как приговор к жизни представленного объекта. Другой вопрос, что за внешней «сделанностью» может таиться пустота и нежизнеспособность продукта в мире реальном. Информационное поле интернета усеяно вещами, выполненными в программе 3-D моделирования с применением эффектного «drama» – освещения, но остающиеся только красивыми картинками. Создать конечный продукт способен лишь тот студент, который будет способен заранее спрогнозировать само изображение на мониторе в наиболее выгодном ракурсе, используя все навыки грамотного его представления, полученные на начальном этапе обучения.

Рассмотрим компьютер как мощный инструмент в руках человека. В какой-то мере это «большой карандаш» для дизайнера. Если начать издалека, то рука человека всегда участвовала в познании мира и «формировании» головы – способности человека размышлять. Посмотрите на младенца – его интересует все, что его окружает, он все трогает руками, тактильные ощущения ему необходимы в познании окружающего мира, заботливые родители показывают ребенку, как пользоваться предметами: ложкой, ручкой и т.д. Первобытный человек взял в руки палку и превратился в «homosapiens», заострил один конец палки – получил более совершенный инструмент по сравнению с предыдущим, он теперь может с большей долей вероятности предположить, что у добычи меньше шансов уйти от него, то есть человек уже может спрогнозировать ситуацию. На протяжении всей истории человечества рука помогала развиваться голове человека. В данном случае, мы имеем инструмент (например, компьютерную программу 3-DMax), обладающий бездной возможностей, которую студенту предстоит постигать и постигать. Программа предлагает готовые материалы и фактуры, начинающему дизайнеру нужно лишь выбрать необходимое из предложенного, затем собрать все воедино. Но создавая трехмерную модель в компьютерной программе, автор начинает мыслить не эстетическими категориями, а задается целью чисто математического порядка - как построить эту вещь, как вытянуть объем, какую из предложенных фактур использовать, как сделать наиболее эффектное «драматичное освещение», сообразно своему вкусу и уровню знаний, уже не задумываясь о том, как будет выглядеть объект в реальном мире. Студент начинает мыслить, как рациональный исполнитель, а не как создатель, потому что он отдает ко-

манды машине, а машина в ответ может только сложить полученную информацию, и не может отделить главное от второстепенного, не может также спрогнозировать ситуацию. В работе с программой 3-D моделирования преобладает не эмоция и выразительность, а логика последовательности действий. Происходит доминирование прагматики в образе создаваемой вещи, а не чувства, которые мы будем испытывать, как потребители. Как потребители, мы выбираем понравившуюся вещь, потому что она вызывает у нас определенные положительные эмоции, и только потом мы смотрим на присутствующие в ней функции.

В самой передовой области дизайна – автомобилестроении, существуют две не соприкасающиеся между собой специальности – дизайнер и 3-D модельщик. Первый свободен и неудержим в своем полете фантазии, другой облекает идеи в зримые формы. Им бывает трудно понять друг друга: на представленный дизайнером эскиз последний может заявить, что он не может «прочесть» нарисованную поверхность с листа или предположить, что ее невозможно воплотить в модели. Оба заняты решением одной задачи – созданием нового объекта, но идут к ней разными путями: через выразительность и ассоциации и через логику построения объекта в компьютерной программе. Различные алгоритмы деятельности приводят к различным алгоритмам мышления и восприятия. По опыту дизайнеров, работающих в автомобилестроении, для полноты восприятия и понимания объема, недостаточно только рисунка на плоскости листа, им обязательно нужны тактильные ощущения и создание макета. Тогда изображение на плоскости будет представлено более грамотно и легче воспринимается зрителем. Компьютерная 3-D программа не всегда может отобразить ожидаемые особенности поверхности формы, иногда картинку с объемным моделированием дорисовывают в графической 2-D программе. В автоиндустрии дизайнеры до сих предпочитают объемный пластилиновый макет компьютерному моделированию, для них 3-D моделированием остается пластилин.

В процессе занятий по рисунку для промышленных дизайнеров на начальном этапе обучения были замечены определенные трудности в выполнении задач, направленные на развитие пространственного мышления и выполнение рисунков по представлению. Первая и наиболее грубая ошибка, которая «бросалась» в глаза в работах студентов – это отсутствие элементарных знаний перспективы. Следующие ошибки состояли в неумении грамотно распределить тень по объекту изображения и отсутствие логического построения объекта. При выяснении причин сложившейся ситуации выяснилось, что при выполнении курсовых работ по проектированию на начальном этапе обучения студенты пользовались компьютерной программой 3-D моделирования, которая «брала на себя» выполнение задач перспективных изменений и освещения объекта. То есть востребованность знаний перспективы и грамотного наложения теней отпадала сама

собой. Получалось, что рисовать с натуры способности остались, а воспроизвести по представлению тот же объект в другом ракурсе и в другой ситуации студент может лишь с большим трудом. В рисунках студентов старших курсов также присутствовало явное влияние программ трехмерного моделирования. В некоторых изображениях повторялись приемы и методы (даже композиционное расположение объектов на листе) программы 3D-Max, что не может не влиять на творческие, созидающие способности студента-дизайнера. Если в прошлом мы изучали математику на основе зрительных образов – складывали яблоки и груши, то сейчас наши дети перешли на складывание отвлеченных образов – цифр. Обучение приближается к двоичной системе и основано на логике, наши дети быстрее осваивают компьютер, быстрее находят нужную кнопку, лучше ориентируются в программах, меньше пишут вручную, больше печатают, они обладают другим алгоритмом поиска информации, Для них картинка на мониторе совмещает инструменты (справа) и результат (слева). И нам необходимо считаться с появлением детей, обладающих другим мышлением.

Никто не будет настаивать на том, что все графические работы студент должен выполнять вручную – современные требования к графическим навыкам вполне определенные. Но на начальном этапе обучения влияние программ трехмерного моделирования весьма значительны на образ мыслей студента. Ждать абитуриента, обладающего достаточной степенью знаний изобразительной грамоты, нам, увы, сейчас не приходится. У нас технический вуз – СПбГПУ, и не художников мы здесь воспитываем. Опасность «компьютерного соблазна» кроется не в том, что студент пользуется современными техническими методами получения изображения, а в том, что он отвыкает думать об объекте, как о целостной системе, и, как следствие теряет способность к созданию чего-либо принципиально нового, с самого начала работает только, как заформализованный исполнитель, что губительно для его успешной карьеры в сфере дизайна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

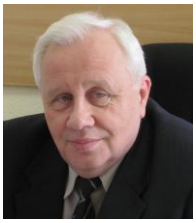
1. Авсиян О.А. Натура и рисование по представлению: учеб. пособие [Текст] /О.А. Авсиян. М.: Изобразительное искусство, 1985.- 152с.
2. Арнхейм Р. Искусство и визуальное восприятие: учеб. пособие [Текст] / Р.Арнхейм. М.: Прогресс, 1974.-392с.
3. Е.П. Бояшова, Д.В. Волошинов, В.В. Грязнов. О некоторых аспектах дизайн-проектирования в свете многомерного геометрического моделирования // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции / Под. ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 17-24.

4. О.В. Мкртычев. Компьютерные технологии в преподавании ТММ цель или средство? // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции / Под. ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 96-102.
5. О формировании профессиональных качеств образно-перцептивного восприятия предметного мира в пространствах различной размерности / Артемьев В.В. [и др.] // Материалы междунар. науч.-практ. конференции, часть 4, ММФ – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. 134-136.
6. Семантическая нагрузка рисунков дизайнера на основных этапах дизайн-проектирования (методические аспекты) / Артемьев В.В. [и др.] // Материалы междунар. науч.-практ. конференции. Лучшие доклады. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.С. 296-299.
7. К. Ходаковский. Как Интернет делает нас бестолковыми [Электронный ресурс] // 3Dnews Daily Digital Digest. URL.: http://3dnews.ru/news/kak-internet-delaet-nas-bestolkovimi (дата обращения16.09.2010).
8. А.А. Рязанцев. Экранный характер современной культуры [Электронный ресурс] // Аналитика культурологии. Электронное научное издание. Выпуск 2 (23) 2012. URL.: http://analiculturolog.ru
9. К. Г. Фрумкин. Откуда исходит угроза книге. Опубликовано в журнале «Знамя» 2010. №9. [Электронный ресурс] // Журнальный зал. Некоммерческий литературный интернет-проект. URL.: http://magazines.russ.ru/znamia/2010/9/fr.html
10. А.А. Поскряков. Инновационная культура и креативность. [Электронный ресурс] // В сб.: Теория и методология творчества: итоги и перспективы. М., Институт философии РАН, Российское философское общество, 2001. URL.: http://twirpx/com/file/149656/

УДК 378.14

В.В. Букреев, В.Ю. Клюкин, М.М. Радкевич

ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ И ПЕРЕПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО АВТОМОБИЛЬНОГО КЛАСТЕРА



Владимир Васильевич Букреев, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552 -66-23, E-mail: mmfdec@stu.neva.ru.



Валерий Юрьевич Клюкин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552 -66-23, E-mail: mmfdec@stu.neva.ru.



Михаил Михайлович Радкевич, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552 -66-23, E-mail: mmfdec@stu.neva.ru.

Аннотация

Рассмотрен вопрос подготовки кадров для автомобильного кластера Санкт-Петербурга в Институте металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета. Дана оценка основных направлений подготовки.

Ключевые слова: автомобильный кластер, подготовка кадров.

ABOUT THE ORGANISATION OF TRAINING OF STUDENTS AND RETRAINING OF EXPERTS FOR ST.-PETERSBURG AUTOMOBILE CLUSTER

Dr. Vladimir V. Bukreev[1], Dr. Valery Yu. Klyukin[1], Dr. Michail M. Radkevich[1], [1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia,
E-mail: mmfdec@stu.neva.ru

Abstract

The question of a professional training for automobile cluster St.-

Petersburg at Institute of metallurgy, mechanical engineering and transport of the St.-Petersburg polytechnical university is considered. The estimation of the basic directions of preparation is given.

Key words: automobile cluster , a professional training.

В последнее время в Санкт-Петербурге и Ленинградской области активно развивается автомобильная отрасль. Введены в строй и приступили к активному выпуску автомобилей такие заводы как Форд, Тойота, Хундай, GM, Ниссан. Годовая программа выпуска автомобилей на этих предприятиях постоянно увеличивается и в перспективе может достигнуть половины выпуска зарубежных автомобилей в стране. В настоящее время выпуск автомобилей в Северо-западном регионе составляет четверть выпуска всех автомобилей в стране. В Санкт-Петербурге также организованы и активно работает предприятие по производству автобусов.

Кроме автомобильных заводов введены в эксплуатацию предприятия, поставляющие комплектующие для существующих заводов, например, фирмы Магна.

В соответствии с постановлением № 166 Минэкономразвития России, приказом Минпромторга России и Минфина России № 73/81/58н экономически целесообразным для зарубежных компаний является объем выпуска автомобилей, который составляет 25000 штук. В соответствии с указанным приказом импортированные части и компоненты автомобиля не должны превышать 70 процентов от его стоимости.

Эти постановление и приказ, а также стабильный спрос на автомобили в России вызвали увеличение производственных мощностей автомобильных предприятий. Однако при этом предприятия начинают испытывать острый дефицит рабочих и инженерных кадров.

В связи с этим актуальной становиться проблема подготовки рабочих кадров. В 90-х годах эта проблема решалась за счет подготовки рабочих кадров на базе бывших ПТУ и техникумов. При этом подготовка была ориентированна на сервисное обслуживание автомобилей. Практически эта система сохранилась и в настоящее время, но на современной материальной базе, что позволяет готовить высококвалифицированные рабочие кадры. Однако ориентироваться только на подготовку рабочих в сфере обслуживания и ремонта автомобилей недостаточно.

Специфика работы на автомобильном предприятии наряду с профессиональными навыками требует и другие качества. Прежде всего, строжайшего соблюдения технологической дисциплины и умения работать в заданном темпе.

Довольно большая часть рабочих, занятых в настоящее время на производстве автомобилей, пришла из других отраслей. По-видимому, эта тенденция сохраниться и в дальнейшем. И здесь основная задача - быстрая

адаптация вновь поступивших рабочих к потребностям производства путем повышения их профессиональных знаний.

В области подготовки инженерных кадров для автомобильной промышленности ситуация может быть улучшена за счет не только подготовки специалистов в вузах, но и за счет переподготовки инженерных кадров.

Существовавшая в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете и других технических вузах города подготовка специалистов для автомобильной отрасли была ориентирована на подготовку в области разработки и эксплуатации транспортных средств, а не на подготовку специалистов, ориентированных на производство автомобилей. Технологии и оборудование, используемые в автомобильной промышленности близки к классическому машиностроению.

В связи с этим, основная потребность в специалистах на автосборочных производствах, которые работают в нашем регионе, связана с нехваткой специалистов в таких областях как:

-сварочное производство;

-сборочное производство;

-окрасочное производство.

Вместе с тем, необходимы специалисты и в области автоматизации производства, мехатроники и др. Такие специалисты должны уметь эффективно использовать имеющееся на автомобильных заводах оборудование.

Как было сказано выше, основная направленность работы технических специалистов на предприятиях автомобильного кластера Санкт-Петербурга – эксплуатация и модернизация технологического оборудования, а не проектирование автомобилей.

В связи с этим можно сказать, что для эффективной и реальной помощи предприятиям автомобильного кластера в подготовке и повышении квалификации кадров существенную роль мог бы сыграть и Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ, многие из выпускников которого уже работают на ведущих технических должностях предприятий автомобильного кластера города. На кафедрах института имеется опыт подготовки специалистов для автомобильных заводов, например, для ВАЗа. Разработаны профили подготовки, ориентированные на автомобильную отрасль. Имеются рабочие планы и программы дисциплин. Этот опыт можно эффективно использовать и на автомобильных предприятиях региона.

Кроме этого накоплен опыт работы по повышению квалификации работников автомобильных заводов. Занятия могут проводиться в объеме 72 часов с выдачей документа государственного образца. Однако предприятия не всегда могут освобождать для обучения работников на длительный срок, поэтому для них и интересны кратковременные курсы, объем которых зависит от рассматриваемой тематики. В институте проводятся кратковременные курсы для работников автомобильной отрасли по отдельным

направлениям, например, по пневматическим и гидравлическим системам автоматизации, системам безопасности фирмы «SICK», вакуумной технике и др.

Что же касается вопросов обеспечения безопасности на автопроизводстве, то и здесь институт мог бы оказать существенную помощь автомобильным заводам.

Следовательно, можно выделить основные аспекты взаимодействия института металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ и предприятий автомобильного кластера Санкт-Петербурга:

- подготовка студентов, ориентированных на работу на автопредприятиях;
- повышение квалификации и переподготовка инженерных кадров автомобильных предприятий;
- повышение теоретических знаний рабочих кадров;
- проведение тренингов по охране труда и технике безопасности.

Подготовка студентов должна сочетать базовые дисциплины государственного стандарта и дисциплины, необходимые для работы в автомобильном производстве. Особое внимание следует уделять проведению практик на предприятиях автомобильного кластера, выполнения на этих предприятиях курсового и дипломного проектирования по автомобильной тематике. Задания на проектирование и практику должны быть согласованы с представителями предприятий и ориентированы на перспективу.

В рамках колледжа, входящего в состав СПбГПУ может быть организована подготовка среднего управленческого звена для производства. При этом также можно использовать образовательные возможности СПбГПУ и, в том числе, Института металлургии, машиностроения и транспорта.

В заключение можно сказать, что возможности института металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ позволяют эффективно взаимодействовать в области подготовки и переподготовки кадров с предприятиями автомобильного кластера Санкт-Петербурга.

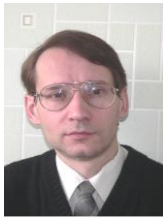
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков Д.А. Анализ текущего положения автомобильной промышленности и перспективы ее инновационного развития [Текст] / Д.А. Лыков, А.Ю. Платко // Автомобильная промышленность - 2012. №1.

УДК 378.14+519.2

А.Л. Буляница

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ КУРСА ПО ВЫБОРУ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ФАКУЛЬТЕТОВ НА ПРИМЕРЕ ДИСЦИПЛИНЫ «МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА»



Антон Леонидович Буляница, д.ф.-м.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-1293, E-mail: antbulyan@yandex.ru

Аннотация

В работе обсуждены основные принципы формирования программы курса «Математическая статистика» для студентов второго курса кафедры «Машиноведение и основы конструирования» СПбГПУ. Специфика курса состоит в том, что в течение трех предшествующих семестров студенты изучают основные разделы «Высшей математики», включая и теорию вероятностей. В то же время, статус курса по выбору не позволяет ограничиваться общеобразовательной функцией углубленного изучения статистики, требует постановки более широких задач изучения, например, методы обработки экспериментальных данных и, при этом, более тесной стыковки со смежными учебными дисциплинами. Результатом реализации предложенных принципов является примерный учебный план дисциплины.

Ключевые слова: математическая статистика, общеобразовательная функция, обработка экспериментальных данных, учебный план

A.L. Bulyanitsa

PRINCIPLES OF PROGRAM'S FORMATION OF THE CHOICING BRANCH FOR STUDENTS OF TECHNICAL FACULTIES BY THE EXAMPLE OF DISCIPLINE «MATHEMATICAL STATISTICS»

D.Sci. Anton L. Bulyanitsa, St.Petersburg State Polytechnic University, Russia,
e-mail: antbulyan@yandex.ru

Abstract

In article main principles of program's formation of a discipline «Mathematical statistics» for second year's students of department «Machines studying and bases of designing» Saint-Petersburg State Polytechnic University are discussed. Specificity of this discipline will be, that during three previous semester

students study the basic directions of «Higher mathematics», including probability theory. At the same time, the this status for discipline does not allow to be limited to general educational function of the profound studying of statistics, demands statement of wider problems of studying, for example, methods of processing of experimental data and, thus, closer connecting with adjacent subject matters. Result of realization of the offered principles is the provisional curriculum of discipline.

Key words: mathematical statistics, general educational function, processing of experimental data, the curriculum

Курс по выбору под условным названием «Математическая статистика» для студентов второго курса кафедры «Машиноведение и основы конструирования» (заведующая – д.т.н., проф. Скотникова М.А.) читается во втором семестре общим объемом 3 часа в неделю.

Цель курса, учебные задачи и его содержание обуславливаются следующими обстоятельствами:

A. Цель курса должна быть сформулирована шире, нежели «Математическая статистика». По-существу, предметом изучения должны стать основные методы анализа и обработки экспериментальных данных. Следовательно, отталкиваясь от двух главных задач эксперимента: количественное оценивание параметров (характеристик) исследуемого физического объекта и проверка теоретических положений (или гипотез), могут быть определены основные разделы курса и их естественная логическая последовательность.
B. Как правило, за три предшествующих семестра в рамках курса «Высшая математика» студентами пройдены основные разделы (дифференциальное и интегральное исчисление, линейная алгебра, дифференциальные уравнения и теория вероятностей). Вместе с тем, близкие по содержанию дисциплины, например, вычислительная математика, изучаются одновременно с рассматриваемым курсом, что позволяет эффективно формулировать и рассматривать «смежные» (комплексные) задачи и алгоритмы.
C. По сравнению с традиционными разделами курса «Высшей математики» целесообразно изменить привычную стилистику изложения материала. В частности, требуется увеличить долю иллюстрирующих примеров, т.к. курс предполагает большое количество практических приложений. Кроме того, наряду с теоретическими положениями (доказательства теорем, принципов, обоснование методов) в некоторых случаях бывает достаточно изложить лишь суть (общую идею) какого-либо метода обработки экспериментальных данных на ознакомительном (описательном) уровне.
D. Наконец, при определении учебных материалов целесообразно использовать сочетание классических учебников и задачников ([3], [6] и,

до некоторой степени, [5]) и учебных и учебно-методических пособий, специализирующихся на более узком круге задач. Практически получается следующая схема: два-три классических (достаточно универсальных) учебника, охватывающих на уровне общей информации все изучаемые вопросы, и несколько (3-5) учебных пособий, связанных с отдельным разделом (темой) в рамках курса.

Основываясь на описанных выше принципах, предложена схема курса по обработке экспериментальных данных, в настоящее время представленного в учебном плане, как курс по выбору с условным названием «Математическая статистика».

Приведенное далее схематическое построение курса примерно соответствует логической последовательности анализа информации, полученной в результате эксперимента: общая структура погрешностей измерения с преимущественным исследованием случайных и грубых погрешностей; методы отбраковки грубых погрешностей; понятие «оценки», исследование их свойств, выбор оптимальных оценок в соответствии с различными критериями и, наконец, получение точечных или/и интервальных оценок параметров. Эти этапы условно можно отнести к первичной обработке информации. Далее, последовательно, рассматриваются вопросы сравнения результатов различных экспериментов (дискриминантный и корреляционный анализ). В первую очередь представляет интерес трактовка совпадения экспериментальных данных, полученных различными исследователями. Здесь, наряду с описанием основных методов решения следует уделить внимание и количественным критериям и оценкам. В значительной степени этим подходом обоснована структура учебного пособия [1]. Наконец, заключительная часть курса может быть посвящена методам построения детерминированных функциональных зависимостей, наиболее наглядным математическим моделям, а также применениям вероятностных методов при решении задач, формально относящихся к другим разделам математики.

Именно эти соображения определили последовательность и содержание разделов курса, описанных далее по общей схеме: название и круг изучаемых вопросов, особенности, связанные как с содержанием, в частности, степень распространенности (или, наоборот, специфичности) подходов, так и с требованиям к математической подготовке и, наконец, оценку значимости (вклада) в процентах. Последнее может понадобиться в перспективе при планировании экзаменационных (тестовых) вопросов, чтобы получить обоснованное тематическое распределение.

Раздел 1 «Основные понятия» содержит ключевые определения погрешностей (систематические, случайные, грубые), понятий оценивания и компенсации.

Содержание: способы борьбы с разными видами погрешностей, формальная связь систематических погрешностей (задача компенсации) и ин-

формативных сезонных трендов (в большинстве случаев, задача оценивания).

Особенность: часть понятий вводилась ранее (например, в рамках лабораторных работ по физике) и в разделе курса математики «Теория вероятностей».

Вклад: 10% от общего объема.

Раздел 2, включает понятия оценки и виды оценок, в первую очередь, линейные оценки; основные свойства оценок (состоятельность, несмещенность, эффективность), анализ их противоречий и методы построения; метод максимального правдоподобия, как теоретическая основа построения эффективных оценок; точечные и интервальные оценки.

Содержание:

A. Получение интервальных оценок математического ожидания и дисперсии,
B. Проверка гипотез о законе распределения на базе критерия согласия Хи-квадрат.

Особенности: теоретические основы (понятие случайных величин, моментов распределения и т.п.) были изучены непосредственно в предшествующем семестре. На первом курсе в рамках лабораторных работ по физике, по-существу, решалась задача интервального оценивания физической величины. Однако, к этому моменту теоретическая база математических знаний была недостаточна. Кроме того, практически не рассматривались иные законы распределения, кроме нормального и распределения Максвелла.

Таким образом, дополнительная задача состоит в ознакомлении с другими традиционными вероятностными моделями и их областью применения. По крайней мере, на ознакомительном уровне можно представить информацию о применении равномерного закона (квантование сигнала по уровню или округление, если указанный фактор доминирует в эксперименте), симметричное экспоненциальное распределение Лапласа (погрешность аналоговых электрических приборов, например, вольтметров), распределения Рэлея (модель амплитуды боковой качки корабля) и Парето (классическое распределение населения по уровню доходов) и т.п.

Кроме того, в некоторых случаях приходится бороться с так называемым «стереотипом 3σ», поскольку соответствующее правило для нормального закона распределения иногда автоматически и необоснованно обобщается на произвольную случайную погрешность. Здесь следует обратить внимание, что для равномерного закона даже «2σ» не существует. В то же время, в работе [5] приведена заслуживающая внимания приближенная оценка доверительного интервала 90%, равная $2k\sigma, k = 1{,}65 \pm 0{,}05$ для достаточно широкого класса распределений.

Вклад: 20%, учитывая важность вопросов первичной обработки информации.

Раздел 3 «Основы корреляционного анализа» содержит методики оценивания коэффициента корреляции (выборочный, медианный, ранговый, знаковый [1]) и, что не менее важно, интерпретацию результатов их комплексного применения.

Содержание: примеры анализа многомерных (например, биомедицинских) объектов с формулированием выводов о степени (характере) зависимости между его характеристиками на базе корреляционного анализа.

Особенности: практически не требует специальных знаний. При этом, хорошо стыкуется с некоторыми задачами вычислительной математики (в частности, упорядочивание/ранжирование элементов выборки). Восприятию результатов способствует возможность выбора иллюстрирующих примеров из области медицины, например, связь роста и веса, повышение температуры и частоты пульса и т.п., очень хорошо известных и осознаваемых на житейском уровне восприятия.

Вклад: 20%

Раздел 4 «Дискриминантный анализ и задачи классификации».

Содержание:

A. Оценка однородности выборок (обобщенный критерий Стьюдента) для сравнения результатов двух разных экспериментов и для отбраковки грубых погрешностей,
B. Классификация на основе одно- и двухпороговых алгоритмов: основные понятия и показатели качества, область неопределенности, ошибки первого и второго рода,
C. Общее представление о проекционных методах классификации многомерных объектов, например, метод главных компонент в сравнении с идеологией распознавания образом по типу «электронного носа» и «электронного языка».

Особенности: концепция и техническая реализация метода главных компонент (пункт B) требует дополнительного изучения проблемы собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы. Эти задачи в последнее время остаются за рамками изучения алгебры матриц курса Высшей математики. При этом, проблема собственных чисел также связана со степенью обусловленности матрицы коэффициентов систем линейных алгебраических уравнений, что, в свою очередь, крайне важно для анализа чувствительности (устойчивости) решений.

Вклад: 15%

Раздел 5. Построение функциональных зависимостей $Y = F(X)$ по экспериментальным данным.

Содержание:

A. Интерполяция, аппроксимация, сплайны – анализ свойств каждого из подходов,

В. Построение простейших аппроксимирующих зависимостей вида $Y = AX + B$, $Y = AX^B$, $Y = \frac{X}{AX + B}$, $Y = A + B / X$ и т.д.

Особенности: непосредственная связь с содержанием курса Вычислительной математики (прежде всего, раздел А). Вторая особенность – очень высокая распространенность рассматриваемых в разделе Б моделей и сценариев: линейный и нелинейный рост, неограниченный (или ограниченный) рост с «насыщением» и т.п.

Особый подход, используемый в разделе Б, состоящий в идентификации типа зависимости (основано на сравнении средних арифметических, геометрических и гармонических), преобразования к виду линейного сигнала в новой системе координат и последующей унифицированной процедуры построения линейной аппроксимации по МНК на уровне общей концепции обсужден в [4]. Преобразование идеи к набору алгоритмов решения и соответствующие учебные задачи приведены, в частности, в [2].

Вклад: 15%

Раздел 6. Применение вероятностных методов для решения различных математических задач.

Содержание: основы метода Монте-Карло и его практическая реализация на примере вычисления определенных интегралов.

Особенности: раздел интегрального исчисления, включая понятие о неберущихся интегралах, а также понятия классического эксперимента, классической (геометрической) вероятностей изучены. Разумеется, применение методов Монте-Карло не ограничивается вычислением интегралов, но именно данное приложение представляется наиболее наглядным.

Вклад: 10%

Раздел 7. Основы математического моделирования и построение математических моделей в форме дифференциальных уравнений первого порядка.

Содержание:

А) Модели развития популяции и их приложения в других областях (например, уравнение логистического роста Ферхюльста),

В) Простейшая модель экологической катастрофы по В.И. Арнольду (описание различных сценариев развития экосистемы: выход на стационарную численность популяции, гибель популяции и т.д.).

Особенности: раздел «Дифференциальные уравнения» курса «Высшей математики» освоен в объемах, достаточных для решения дифференциальных уравнений (в большинстве своем, либо с разделяющимися переменными, либо Бернулли).

Вклад: 10%.

Таким образом, при подобном подходе к построению курса, помимо цели углубленного изучения материала, касающегося методов первичной и вторичной обработки экспериментальных данных, в значительной степени

реализуется более тесная связь с тематикой других курсов, в первую очередь, вычислительной математикой.

Полученные знания впоследствии могут быть применены при изучении любой дисциплины, предполагающей экспериментальные исследования и обработку их результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буляница А.Л., Курочкин В.Е., Кноп И.С. Методы статистической обработки экологической информации: дискриминантный, корреляционный и регрессионный анализ. – учеб. пособие. – СПб.: СПбГУАП; ИАП РАН, 2005. – 48 с.
2. Буляница А.Л. Принципы построения градуировочных зависимостей в приборах химического и биологического экспресс-анализа. – учеб.-метод. Пособие. – СПб.: ИАП РАН, 2012. – 28 с.
3. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. – М: Наука, 1988. – 448 с.
4. Мидгли Д., Торренс К. Потенциометрический анализ воды. – М: Мир, 1980. – 517 с.
5. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л: Наука, 1991. – 248 с.
6. Свешников А.А. Сборник задач по теории вероятностей. – М: Наука, 1965. – 448 с.

УДК 514.85

Д. В. Волошинов, М. С. Кокорин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ПРОЕЦИРОВАНИЯ В ПРАКТИКЕ ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



Денис Вячеславович Волошинов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7514, E-mail: volosh@pochta.ru



Михаил Станиславович Кокорин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7514, E-mail: korms63@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы графического решения задач курса геометрического моделирования на примерах известных задач механики. Результаты показали широту использования такого метода преобразования проекций как метод дополнительного ортогонального проецирования. Полученные результаты полностью совпадают с известными аналитическими решениями, что демонстрирует универсальность методов геометрического моделирования.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, метод дополнительного ортогонального проецирования, пространственные шарнирные механизмы, винтовое перемещение

D.V.Voloshinov, M.S.Kokorin

USE OF ADDITIONAL ORTHOGONAL PROJECTION IN THE TEACHING PRACTICE OF GEOMETRIC MODELING COURSE

Dr. prof. Denis V. Voloshinov[1], e-mail: volosh@pochta.ru;
Dr. Mikhail S. Kokorin[1], e-mail: korms63@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper deals with the graphic solution of problems of geometric modeling course with examples of known problems in mechanics. The results showed widespread use of this method as a method of projection transformations additional orthogonal projection. These results coincide with the known analytical solutions, which demonstrates the versatility of the method of geometric modeling.

Key words: geometry modeling, method of additional rectangular projection, spatial linkage mechanisms, screw movement

Геометрическое моделирование является дисциплиной, представляющей методы решения задач, имеющих геометрическую сущность на основе единых представлений о моделировании пространств различной размерности. С этой точки зрения моделирование трехмерного пространства с использованием эпюра Монжа является частным случаем отображения пространств размерности *n* на моделях размерности *n-1*.

Авторы имеют многолетний опыт преподавания графических дисциплин в СПбГПУ, а также курса геометрического моделирования как факультативного в ряде средних учебных заведений г. Санкт-Петербурга. Материал доклада основан на этом опыте.

Изучение курса геометрического моделирования основано на работах Валькова К.И. [1, 2] и созданной им научной школы. Курс рассматривает построение обратимых изображений трехмерного пространства на основе сведений, излагаемых в курсах таких дисциплин, как проективная, начертательная и аналитическая геометрии. Подход, основанный на совместном преподавании элементов геометрической теории не однократно использовался на практике [3, 4], и наш опыт говорит о его плодотворности. Рассматриваемые примеры решения практических задач относятся к областям инженерной графики, технологии машиностроения, теории механизмов и машин, теоретической механики.

Метод дополнительного ортогонального проецирования (ДОП) занимает ведущее положение среди методов преобразования проекционной картины и является одним из частных случаев общей схемы построения изображения на некотором избыточном поле проекций, известной как метод Гаука [1].

Иллюстрацией использования метода ДОП выступают как правило позиционные и метрические задачи начертательной геометрии. Создание ортогональных проекций на машиностроительных чертежах также рассматривается как результат использования метода ДОП.

Однако, практическая реализация метода ДОП намного шире, поэтому целью настоящей работы является иллюстрация использования метода дополнительного ортогонального проецирования в решении прикладных

задач механики и как следствие расширение методической базы курсов «Геометрическое моделирование» и «Начертательная геометрия. Инженерная графика», являющегося общепрофессиональной дисциплиной для большинства направлений подготовки бакалавров.

Пример 1. Кинематический анализ пространственных механизмов.

Теория кинематического анализа пространственных механизмов в основном была создана в середине прошлого столетия. Большинство решений осуществлялось графоаналитическими методами [5], но эти решения в основном рассматривали кинематику мгновенных состояний. Вследствие этого при задании механизма можно было располагать только одним его положением. Сложность реализации графических решений этой задачи явилась одной из причин бурного развития аналитических методов исследования кинематики пространственных механизмов.

Развитие средств вычислительной техники, в частности, прикладных графических программ вносит существенные изменения в кинематический анализ. Результат графических решений оказался сопоставимым по точности с аналитическими решениями, но превосходящим его по наглядности и очевидности построений. Использование графического решения дает возможность оценить корректность решения «на взгляд», что крайне важно в инженерной практике.

Рассмотрим кинематический анализ механизма Беннетта. Механизм Беннетта представляет собой четырехзвенник с вращательными парами, предназначенный для передачи вращения между скрещивающимися осями, в частности, под прямым углом. Механизм в-первые описан более века назад, однако его свойства и условия существования до сих пор привлекают исследователей [6, 7].

Остановимся подробнее на графическом решении задачи о построении плана положений механизма (рис. 1) [8].

Для построения плана положений выберем координатную систему *Oxyz* так, чтобы ось *x* была бы связана со стойкой (точками *O* и *C*). Кривошип *OA* образует со стойкой *OC* первую вращательную пару, вдоль оси которой направлен первый орт ***j*** координатной оси *Oy* (на рис.1 не показан). Кривошип *OA* и шатун *AB* образуют вторую вращательную пару, вдоль оси которой направлен орт **e**. Точка *A* расположена на этой оси и перемещается в координатной плоскости *xOz*. Шатун *AB* и кривошип *BC* образуют третью вращательную пару, вдоль оси которой направлен орт **f.** Точка *B* расположена на этой оси и перемещается в координатной плоскости *xOy*. Кривошип *BC* образует со стойкой *OC* четвертую вращательную пару, вдоль оси которой направлен орт **g**, параллельный координатной оси *Oz*. Точка *C* расположена на координатной оси *Ox*. При некоторых условиях этот механизм существует, т. е. проворачивается, и передает вращательное движение вокруг двух осей, скрещивающихся под прямым углом.

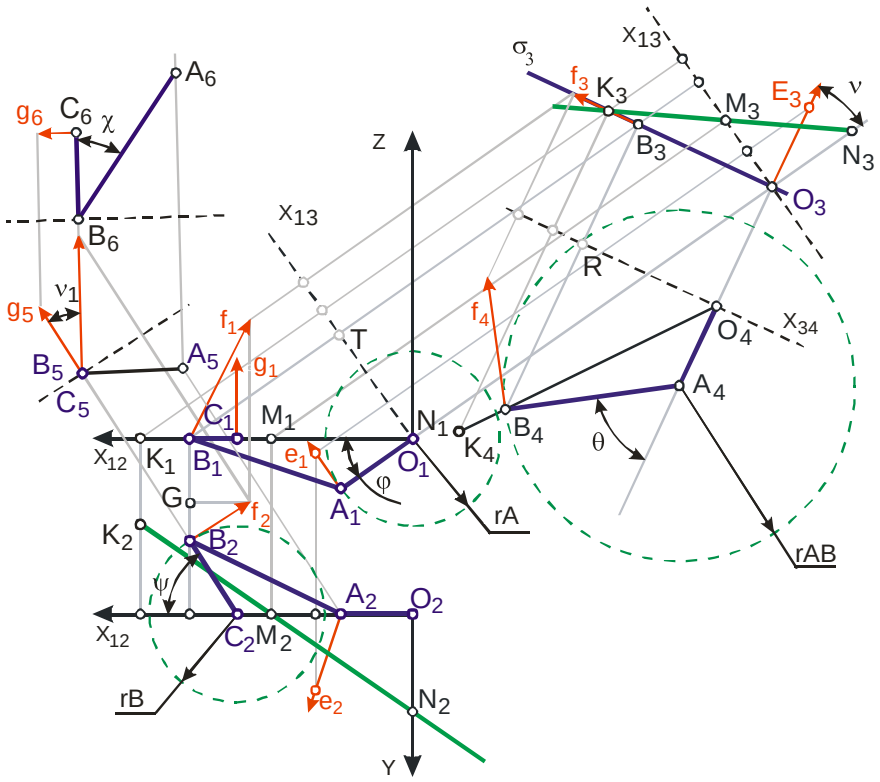


Рис. 1. Геометрическая модель механизма Беннетта

Из расчетной схемы механизма следует, что отрезки *OA* и *OC* перпендикулярны к орту **j**, отрезки *BC* и *OC* перпендикулярны к орту **g** и орты **j**, **g** взаимно перпендикулярны. Кроме того, орт **e** перпендикулярен к плоскости, образованной пересекающимися отрезками *OA* и *AB*.

Условия существования механизма таковы, что длины кривошипов *OA* и *BC* равны. Равны также длины шатуна *AB* и отрезка *OC*, а также углы ν и ν_1, где ν – угол между ортами **j** и **e**, а ν_1 – угол между ортами **f** и **g**.

Углы, характеризующие геометрическую модель:

φ – угол поворота ведущего кривошипа *OA* относительно стойки;

ψ – угол поворота ведомого кривошипа *BC* относительно стойки;

θ – угол поворота шатуна *AB* относительно кривошипа *OA*;

χ – угол поворота шатуна *AB* относительно кривошипа *BC*.

Для дальнейших построений выбираем некоторое значение угла φ поворота ведущего кривошипа *OA*.

В соответствии с методом дополнительного ортогонального проецирования вводим в пространстве третью плоскость проекций π_3 с целью преобразования плоскости *OAB* в проецирующую. Отрезок *OA* является фронталью, следовательно π_3 перпендикулярна к плоскости π_1 и отрезку *OA*. На рис. 1 введение плоскости π_3 отражается осью проекций x_{13} перпендикулярной O_1A_1.

В плоскости π_3 орт **e** и угол ν, составленный ортами **j** и **e**, проецируются в натуральную величину. Фронтальная проекция $\mathbf{e_1}$ орта **e** перпендикулярна линиям связи $\pi_1 \leftrightarrow \pi_3$, что следует из параллельности орта **e** и

плоскости π_3. По двум проекциям $\mathbf{e_1}$, $\mathbf{e_3}$ на рис. 1 построена горизонтальная проекция $\mathbf{e_2}$ орта $\boldsymbol{e}$.

Мысленно разъединим цилиндрический шарнир (точку B) с ортом **f**. Тогда при фиксированном положении кривошипа OA отрезок AB в пространстве будет перемещаться в некоторой плоскости σ, перпендикулярной орту **e** и проходящей через точку A. На рис. 1 изображена третья проекция σ_3 плоскости σ. Эта проекция представляет собой прямую, перпендикулярную к $\mathbf{e_3}$ и проходящую через точку A_3.

Вводим четвертую плоскость проекций π_4, перпендикулярную к π_3 и параллельную плоскости σ. Плоскость π_4 интересна тем, что траектория вращения шатуна AB проецируется на нее без искажения.

Для определения положения шарнира B при заданном угле φ поворота кривошипа необходимо определить точку пересечения траектории вращения точки B с плоскостью xOy. Для построения этой точки предварительно определим линию пересечения плоскостей xOy и σ.

Линия пересечения плоскостей xOy и σ определяется двумя точками, одной из которых является точка O, т.к. обе плоскости проходят через начало координат. Второй точкой определяющей линию пересечения плоскостей является точка K, определяемая по проекции K_3, расположенной в плоскости σ. Имея проекцию K_3 переходим к построению фронтальной K_1 и горизонтальной K_2 проекциям точки К. Затем, в соответствии с методом ДОП, получаем проекцию K_4. Таким образом, в поле π_4 получаем четвертую проекцию прямой O_4K_4, вдоль которой пересекаются плоскости xOy и σ.

Как уже было отмечено, на четвертую плоскость проекций π_4, траектория вращения шатуна AB проецируется в натуральную величину, т.е. окружностью радиуса равному длине шатуна.

На пересечении этой окружности с прямой O_4K_4 получаем четвертую проекцию B_4 точки B. По четвертой проекции B_4 точки B, расположенной на прямой OK, строим сначала третью проекцию B_3, а затем первую B_1 и вторую B_2.

Меняя значения φ угла поворота ведущего кривошипа получаем все возможные положения рассматриваемого механизма, называемые планом положений механизма.

Введение пятой и шестой плоскостей проекций связано с иллюстрацией свойств механизма Беннетта, в частности, равенства углов ν и ν_1, а также равенства углов χ и φ, что означает равенство угла поворота шатуна AB относительно ведомого кривошипа BC и угла поворота ведущего кривошипа OA относительно стойки.

Пример 2. Графическое решение задачи о перемещении твердого тела.

В теоретической механике доказывается теорема о том, что всякое перемещение твердого тела в пространстве трех измерений может рассмат-

риваться как винтовое, состоящее из поступательного перемещения вдоль некоторой оси и поворота его вокруг той же оси на определенный угол. Доказательство проводится на основе известных теорем Эйлера и Шаля: о перемещении тела, имеющего неподвижную точку, и о перемещении плоской фигуры в своей плоскости. В то же время определение параметров винтового движения, соответствующего произвольному перемещению тела в пространстве, возможно провести не только аналитически, но и графически.

В общем случае процесс винтового перемещения твердого тела характеризуется следующими параметрами: положением винтовой линии, углом поворота вокруг оси, направлением вращения и величиной сдвига вдоль оси вращения. Исходными данными для графического решения задачи являются заданные начальное и конечное положения движущегося тела.

Геометрический алгоритм определения параметров винтового движения базируется на известном положении начертательной геометрии о том, что если весь процесс винтового перемещения спроецировать на некоторую плоскость (плоскость параллелизма), перпендикулярную оси вращения, то мы получим две равные геометрические фигуры, являющиеся проекциями движущегося тела на эту плоскость, повернутые на некоторый угол вокруг центра вращения.

Графическая реализация алгоритма решения задачи о перемещении твердого тела в пространстве (рис. 2) основана на использовании метода дополнительного ортогонального проецирования и содержит следующие этапы:

– задание начального и конечного положения геометрического тела;

– параллельный перенос в совмещенное положение и построение плоскости параллелизма;

– построение винтовой оси;

– определение угла поворота и направления вращения; определение величины сдвига вдоль оси винта.

Задание начального и конечного положения геометрического тела. Исходными данными для решения задачи являются два произвольных положения некоторого геометрического тела – тетраэдра. Начальное положение (слева на рис. 2) и конечное (справа) должны являться проекциями одного и того же геометрического тела. Проверка этого условия предполагает двукратное преобразование исходной проекционной картины для начального и конечного положения геометрического тела с целью сохранения постоянства его геометрических размеров. Геометрические размеры рассматриваемого тетраэдра: диаметр окружности, описанной вокруг основания тетраэдра *ABC* равен 50 мм, высота тетраэдра 40 мм. Проверка этого условия выполнена и на рис. 2 не приведена.

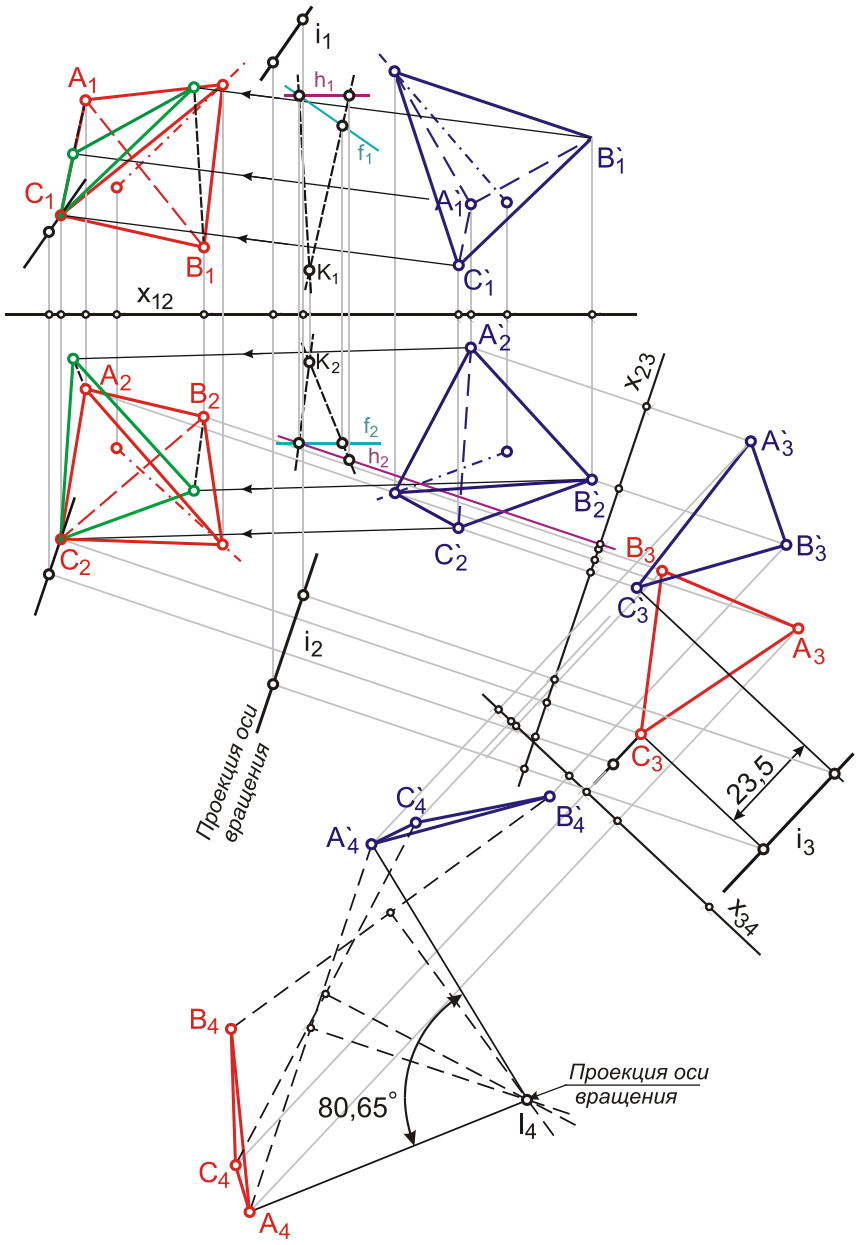


Рис. 2. Графическое решение задачи о пространственном перемещении твердого тела

Реализация дальнейших этапов графического решения выполнена только для основания тетраэдра – треугольника *ABC* с целью сокращения графических построений.

Параллельный перенос в совмещенное положение и построение плоскости параллелизма. Эти этапы графического решения задачи служат для определения направления оси винтового движения, т.к. ось вращения перпендикулярна плоскости параллелизма, определяемой на чертеже линиями уровня (фронталью *f* и горизонталью *h*).

Построение винтовой оси. Двукратная перемена плоскостей проекций приводит нашу систему в положение, при котором на новую горизонтальную плоскость проекций π_4 оба треугольника $A_4B_4C_4$ и $A_4`B_4`C_4`$, являющиеся проекциями основания тетраэдра, проецируются треугольниками одинаковых размеров.

Таким образом, плоскость проекций π_4 оказывается плоскостью параллелизма, в которой и надлежит произвести построения, диктуемые теоремой Эйлера – Шаля о плоском перемещении фигуры в ее плоскости.

Производя эти построения, а именно найдя точку пересечения I_4, мы получаем центр вращения плоских фигур $A_4B_4C_4$ и $A_4`B_4`C_4`$. Точка I_4 является проекцией на плоскость параллелизма винтовой оси i. Обратным переходом в соответствии с методом ДОП получаем основные проекции оси вращения i (i_1, i_2).

Определение угла поворота и направления вращения, определение величины сдвига вдоль оси винта. Угол $\varphi = 80{,}65^\circ$, равный углу $A_4\ I_4\ A_4`$ , представляет собой натуральную величину угла поворота при винтовом передвижении, а направление дуги $B_4B_4`$ показывает направление вращения винтового движения.

Расстояние $C_3C_3`$ представляет собой истинную величину сдвига вдоль найденной оси вращения. В рассмотренном примере величина смещения равна 23,5 мм.

Представленный способ определения параметров винтового перемещения легко контролировать в процессе решения, а именно в плоскости проекций π_4 треугольники $A_4B_4C_4$ и $A_4`B_4`C_4`$ должны получиться совершенно одинаковыми. Величина погрешности может быть определена из сравнения полученных длин отрезков:

$$\left|A_4B_4\right| = \left|A_4`B_4`\right|; \qquad \left|A_4C_4\right| = \left|A_4`C_4`\right|; \qquad \left|B_4C_4\right| = \left|B_4`C_4`\right|.$$

Если расхождение получается значительным, то это может свидетельствовать о наличии ошибок, которые необходимо исправить при проверке отдельных построений.

Таким образом, разработанный геометрический алгоритм позволяет определить все параметры винтового движения твердого тела по заданным начальному и конечному положениям.

Для подтверждения полученных значений выполнен макет, иллюстрирующий пространственное перемещение рассматриваемого геометрического тела в масштабе 2:1. Значения параметров винтового движения геометрического тела, полученные на макете, полностью совпали с параметрами, полученными при графическом решении задачи.

Особенностью рассмотренных задач является их практическая реализация с использованием системы геометрического моделирования «Симплекс», разработанной в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете [8, 9].

Полученные решения совпадают с аналитическими решениями, представленными в соответствующих курсах дисциплин теории механизмов и машин и теоретической механики.

Разработанные геометрические модели могут быть использованы при проектировании технических устройств и систем, а также могут служить частью методического обеспечения курсов начертательной геометрии и геометрического моделирования при изложении метода дополнительного ортогонального проецирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вальков К.И. Лекции по основам геометрического моделирования. Л.: ЛИСИ, 1970. – 249 с.
2. Вальков К.И. Введение в теорию моделирования. Л.: ЛИСИ, 1974. – 151 с.
3. Иванов Г.С. Начертательная геометрия: учебник. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. – 338 с.
4. Курс начертательной геометрии на основе геометрического моделирования: учебник / В.Я.Волков [и др.] – Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. – 253 с.
5. Ананов Г.Д. Кинематика пространственных шарнирных механизмов сельскохозяйственных машин. М.: Машгиз, 1968. – 218 с.
6. Л.Т. Дворников Нетрадиционные рассуждения о существовании механизма Беннетта // Теория механизмов и машин. – 2009. – Том 13. – №1 – С. 5 – 10.
7. Ш.Р. Галлиулин, Р.Ш. Шарданов. О структуре и кинематике пространственного пятизвенного механизма с вращательными парами // Теория механизмов и машин. – 2011. – Том 9. – № 2. – С. 30 – 37.
8. Мудров П.Г. Пространственные механизмы с вращательными парами. // Изд-во Казанского университета, Казань, 1976. – 264 с.
9. Волошинов Д.В. Конструктивное геометрическое моделирование. Теория, практика, автоматизация. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2010. – 355 с.
10. Д.В. Волошинов Применение методов конструктивной геометрии для визуального синтеза и анализа компьютерных программ // Научно-технические ведомости СПбГТУ . – СПб., 2006 . – №3(45) . – С.65–78.

УДК 004.9:621(076.5)

М. М. Донская, В. И. Петраш, Н. А. Солодилова

ПРЕПОДАВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «САПР В МАШИНОСТРОЕНИИ» В ИНСТИТУТЕ МЕТАЛЛУРГИИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТРАНСПОРТА



Марина Михайловна Донская, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел. 8(951)652-38-52, E-mail: mmdon@mail.ru.



Виктор Иванович Петраш, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел. 8(921)653-37-93, E-mail: petrashv@mail.ru.



Наталья Алексеевна Солодилова, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел. 8(911)265-96-55, E-mail: solodna@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы развития преподавания дисциплины «САПР в машиностроении» в институте металлургии, машиностроения и транспорта. Приведено ее содержание и показан даваемый студентам объем знаний и навыков.

Показано использование в процессе обучения полученных студентами знаний и навыков.

Ключевые слова: САПР в машиностроении, автоматизированное проектирование, КОМПАС-3D, SOLIDWORKS, Pro/ENGINEER, ВЕРТИКАЛЬ, ЛОЦМАН.

M.M. Donskaya, V.I. Petrash, N.A. Solodilova

TEACHING THE DISCIPLINE «CAD IN MECHANICAL ENGINEERING» AT THE INSTITUTE OF METALLURGY, MACHINE BUILDING AND TRANSPORT

Marina M. Donskaya[1], e-mail: mmdon@mail.ru;
Dr. Viktor I. Petrash[1], e-mail: petrashv@mail.ru;
N.A. Solodilova[1], e-mail: solodna@yandex.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The issues of the development of teaching the discipline «CAD in mechanical engineering» at the Institute of metallurgy, machine building and transport considered in the article. Its content and the volume of knowledge and skills giving to students shown. Using of knowledge and skills was taking by students, shown in the process of studying.

Key words: CAD in mechanical engineering, Kompas-3D, SolidWorks, Pro/ENGINEER, Vertikal, Locman.

Преподавание дисциплины «САПР в машиностроении» ведется на втором курсе и является необходимым элементом обучения студентов института металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ, способствуя формированию профессиональных навыков разработки проектно-конструкторской и технологической документации на современном уровне.

Обучение студентов использованию систем автоматизированного проектирования (САПР), как основного инструмента автоматизации проектных работ в машиностроении, было начато 14 лет назад на механико-машиностроительном факультете СПбГТУ, ныне институте металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ, силами преподавателей кафедры «Информационные машиностроительные технологии» в рамках дисциплин «Информационные технологии» и «САПР в машиностроении». Первоначально, преподавание велось на базе программного комплекса автоматизированных систем КОМПАС компании АСКОН. Со временем курс непрерывно пополнялся новыми разделами, расширялся лабораторный практикум, обновлялось программное обеспечение. За это время преподавателями кафедры было издано около десяти учебных пособий и лабораторных практикумов [2], [3].

В настоящее время изучение дисциплины включает в себя курс лекций в объеме 18 учебных часов и выполнение лабораторных работ в объеме 36 учебных часов.

В рамках лекционного курса рассматриваются теоретические вопросы САПР, цели создания, составные части, классификация и структура [1]. Приводится обзор современных САПР (CAD, CAM, CAE и PDM - систем) и их особенностей. Изучаются виды, принципы и способы автоматизации проектирования конструкторской документации деталей и сборочных единиц.

Кроме теоретических вопросов САПР в лекционном курсе рассматриваются практические моменты работы на примере CAD - систем КОМПАС и SOLIDWORKS, CAM - системы ВЕРТИКАЛЬ, которые изучаются недостаточно глубоко при проведении лабораторных работ.

В связи с тем, что на современном предприятии наблюдаются важные структурные изменения: переход от автоматизации разрозненных участков

конструкторско-технологической подготовки производства к созданию единого информационного пространства, в лекционном курсе дается ознакомление с новым классом систем, нацеленных на решение задач организации и координации работ процесса проектирования – систем управления данными об изделии (Product Data Management). Представителем этого класса является система ЛОЦМАН: PLM.

ЛОЦМАН:PLM является центральным компонентом единого информационного пространства, объединяющим различные программные продукты САПР. Важным достоинством системы является возможность ведения электронного архива и автоматизации документооборота. Таким образом, прослеживается жизненный цикл изделия.

При выполнении курса лабораторных работ большая их часть проводится на базе системы КОМПАС-3D, компании АСКОН, так как методы моделирования, реализованные в этом программном комплексе, являются на сегодняшний день общепринятыми в большинстве других современных CAD - системах. В процессе выполнения лабораторных работ студенты реализуют стандартный процесс проектирования - от объемной модели механизма к ассоциативным чертежам, спецификации и прочей конструкторской документации до создания технологической документации. При этом элементы документации могут быть ассоциативно связаны на единой платформе программного пакета.

Студенты, не имеющие навыков работы в системе КОМПАС-ГРАФИК, приобретают необходимые сведения на этапе эскизирования 3D-модели.

В институте металлургии, машиностроения и транспорта востребованным является наличие у студентов навыков и приемов проектирования в CAD – системе SOLIDWORKS. С этой целью проводятся работы по трехмерному твердотельному моделированию деталей и сборочных единиц в этой системе.

На практических занятиях студенты имеют возможность познакомиться и с одной из самых мощных систем твердотельного моделирования, используемых для создания 3D моделей деталей и сборок — САПР Pro/ENGINEER Wildfire. Студенты изучают концепцию проектирования Pro/ENGINEER, создают трёхмерные модели детали и сборочной единицы.

Для обучения некоторых групп студентов разработан комплекс лабораторных работ, ориентированных на освоение студентами приёмов создания пользовательских конструкторских САПР в форме 2D - библиотек системы КОМПАС [4]. Комплекс включает следующие работы:

—создание библиотек фрагментов;

—создание библиотек параметрических шаблонов средствами Менеджера шаблонов;

—создание прикладных библиотек, обладающих полным доступом к API(Application Programming Interface) - функциям среды КОМПАС для

выполнения различных построений и манипуляций с графическими объектами и документами.

В последнем случае, создание библиотеки предусматривает организацию интерфейса с основной системой средствами системы программирования Delphi. Интеграция с такой мощной системой позволяет, помимо применения графического инструментария КОМПАС, использовать в создаваемых модулях все преимущества современного объектно-ориентированного программирования.

В настоящее время на кафедре «Конструкторско-технологические инновации» студенты также знакомятся с САПР технологических процессов нового поколения — ВЕРТИКАЛЬ [5]. Создание технологического процесса обработки машиностроительной детали изучается студентами на базе разработанного технологического процесса обработки детали.

Основной особенностью САПР ВЕРТИКАЛЬ является объектно-ориентированный подход, позволяющий объединить конструкторскую и технологическую часть информации. Объекты «переходы» и «конструктивные элементы» имеют двусторонние связи, что позволяет определять как список переходов по каждой поверхности, так и состав поверхностей, обрабатываемых на отдельных технологических операциях.

В ходе выполнения лабораторных работ студенты имеют диалоговый доступ к наглядно представленным сведениям об оборудовании, измерительных и режущих инструментах, и другой информации, заложенной в базе данных системы. Результатом работы является автоматически созданный комплект технологической документации: титульный лист, карта техпроцесса, карта эскизов, маршрутно-операционная карта, ведомость оснастки, материалов и прочее.

В методических пособиях ко всем лабораторным работам, выполняемым на кафедре «Конструкторско-технологические инновации» приводятся теоретические сведения, порядок и протокол выполнения примера задания. Предложены варианты заданий, а также вопросы для контроля освоения материала.

Таким образом, в результате выполнения лабораторных работ, студенты владеют следующими навыками:

— трёхмерное моделирование деталей при помощи основных формообразующих операций;
— моделирование листовой детали;
— моделирование сборок последовательным добавлением моделей компонентов и путем создания компонентов в контексте сборки;
— создание ассоциативного чертежа;
— формирование чертежа машиностроительной детали;
— создание спецификации в автономном и полуавтоматическом режиме;
— создание параметрических чертежей;

— анимация движения трёхмерных моделей сборок;
— разработка технологического процесса обработки детали.

Дальнейшее расширение тематики лабораторных работ планируется за счет обучения студентов навыкам работы в CAE и PDM – системах.

Силами преподавателей дисциплины «САПР в машиностроении» неоднократно были организованы и проведены студенческие олимпиады по компьютерному проектированию для студентов механико-машиностроительного факультета. Студенты факультета принимали участие в проведении международной дистанционной олимпиады «Компьютерные информационные технологии в проектировании». По результатам выполнения заданий в индивидуальном зачете студенты занимали призовые места.

Полученные студентами знания с успехом применяются при выполнении курсовых проектов целого ряда дисциплин института, где САПР используется в качестве базового инструментального средства. Использование инструментов библиотеки анимации позволяет имитировать реальные движения деталей механизма или процесса разборки-сборки на трехмерной модели, что позволяет качественно спроектировать механизм и проанализировать его работу еще в стадии разработки.

Представленный курс позволяет сформировать у студентов профессиональный подход к проектированию, приобрести теоретические знания и практические навыки использования программных продуктов САПР, как инструмента создания проектно-конструкторской и технологической документации, востребованные на предприятиях современного машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 23501.101-87 «Системы автоматизированного проектирования. Основные положения».
2. Донская М.М. САПР в машиностроении: Лаб. практикум / Под ред. проф. Л. Н. Розанова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — 128 с.
3. Солодилова Н.А. САПР в машиностроении. Трёхмерное моделирование в системе КОМПАС: учеб. пособие/Н. А. Солодилова; под общ. ред. Л.Н.Розанова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 196с.
4. Розанов Л.Н., Донская М.М., Гончаров Б.Ф. САПР в машиностроении. Разработка 2D-библиотек для САПР «Компас»: лаб. практикум/Розанов Л.Н., Донская М.М., Гончаров Б.Ф.; под общ. ред. Л.Н.Розанова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 120с.
5. САПР в машиностроении. Компас-график, Компас-3D, Вертикаль, Библиотека анимации [Электронный ресурс] : учебное пособие / М.М. Донская, Н.А. Солодилова ; СПбГПУ, 2013. <URL:http://www.unilib.neva.ru/dl/2948.pdf> (дата обращения: 15.03.2013).

УДК 514.181 + 621.391

Н. С. Иванова, Г. А. Красильникова,
Т. В. Маркова, В. В. Самсонов

ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКЕ



Наталия Сергеевна Иванова, доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: iv_ns@mail.ru



Галина Анатольевна Красильникова, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: kras_gal@mail.ru



Татьяна Владимировна Маркова, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: t_markova@mail.ru



Владимир Викторович Самсонов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический Университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: vvsrz@bk.ru

Аннотация

В докладе рассматриваются проблемы обучения студентов инженерной и компьютерной графике в рамках единого курса на базе КОМПлексной Автоматизированной Системы (КОМПАС-3D). Приводятся примеры тренировочных заданий для приобретения знаний, умений и навыков работы в среде чертежно-графического редактора системы — КОМПАС-График, необходимых при выполнении курсовых работ и курсового проекта по инженерной графике.

Ключевые слова: инженерная и компьютерная графика, КОМПАС-3D.

N. S. Ivanova, G. A. Krasilnikova,
T. V. Markova,V.V. Samsonov

COMPETITIONS IN GRAPHIC DISCIPLINES AS THE STAGE OF ENGINEERING INTELLIGENCE FORMATION

Natalia S. Ivanova[1], e-mail: iv_ns@mail.ru;
Dr. Galina A. Krasilnikova[1], e-mail: kras_gal@mail.ru;
Dr. Tatiana V. Markova[1], e-mail: t_markova@mail.ru;
Dr. Vladimir V. Samsonov[1], e-mail: vvsrz@bk.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

The report considers the problem of teaching engineering and computer graphics in a single course on the basis of the Integrated Automated System (КОМПАС-3D). Here we represent the examples of training tasks applied to acquire knowledge and skills when working in the environment of software system "КОМПАС" graphic editor which are necessary to perform course projects on engineering graphics.

Key words: engineering and computer graphics, КОМПАС-3D.

Развитие средств автоматизированного проектирования, постепенный переход от бумажного документирования к электронному обусловливает необходимость модификации учебных программ дисциплин инженерно-графического цикла. В соответствии с новыми учебными планами подготовки бакалавров по таким направлениям как 150000 «Металлургия, машиностроение и материалообработка», 190000 «Транспортные средства», 220000 «Автоматика и управление», изучение компьютерных технологий создания конструкторской документации начинается уже с первого года обучения студентов в рамках курса инженерной графики [1]. В связи с этим, в рабочие учебные программы дисциплин «Инженерная графика» и «Инженерная и компьютерная графика» включены разделы по изучению правил и освоению приемов разработки конструкторских документов в среде автоматизированной системы проектирования КОМПАС-3D.

Комплексная программа обучения отвечает требованиям федерального государственного стандарта, расширяет возможности преподавателей в подаче материала, повышает интерес студентов к графическим дисциплинам, поэтому позволяет добиться лучших результатов в их освоении. Однако при таком подходе возникает ряд проблем. Различный уровень базовых знаний студентов в области компьютерных технологий требует большей индивидуализации в организации учебного процесса. Дополнительной нагрузкой для преподавателя является проверка электронных чертежей и

осуществление контроля самостоятельности работы студентов при выполнении графических работ с использованием САПР. Объединение инженерной и компьютерной графики требует более интенсивной работы и от студентов: автоматизированные способы работы с чертежом и другими документами не исключают необходимости знания и понимания теоретических основ и положений курса. Так, в первом семестре студенты изучают начертательную геометрию как основу построения чертежа, элементы его оформления [2]. Во втором семестре программой дисциплины предусмотрено выполнение эскизов и чертежей деталей, изучение правил нанесения размеров, шероховатости поверхностей, обозначения резьбы, изображения разъемных соединений, оформления сборочных чертежей и спецификаций. Компьютерные технологии разработки конструкторской документации используются студентами при выполнении ряда индивидуальных графических заданий и курсовой работы «Разъемные соединения», являясь при этом самостоятельным объектом для изучения. Таким образом, приобретаются навыки выполнения чертежно-графических работ традиционным и современным, компьютерным способом. В третьем семестре в курсовом проектировании студенты разрабатывают комплект конструкторской документации на сборочную единицу полностью в автоматизированной среде.

В условиях комплексной программы обучения практические аудиторные занятия направлены на решение одновременно двух задач: изучение правил оформления и разработки конструкторской документации, а также основных принципов выполнения электронного чертежа в КОМПАС-График, чертежно-графическом редакторе системы. Используются различные способы подачи учебного материала: это и установочные лекции по каждому разделу курса, подготовленные на базе демонстрационных компьютерных систем, плакаты и натурные образцы, а также упражнения по изучению системы КОМПАС-3D, выполняемые студентами одновременно с преподавателем в режиме мастер-класса.

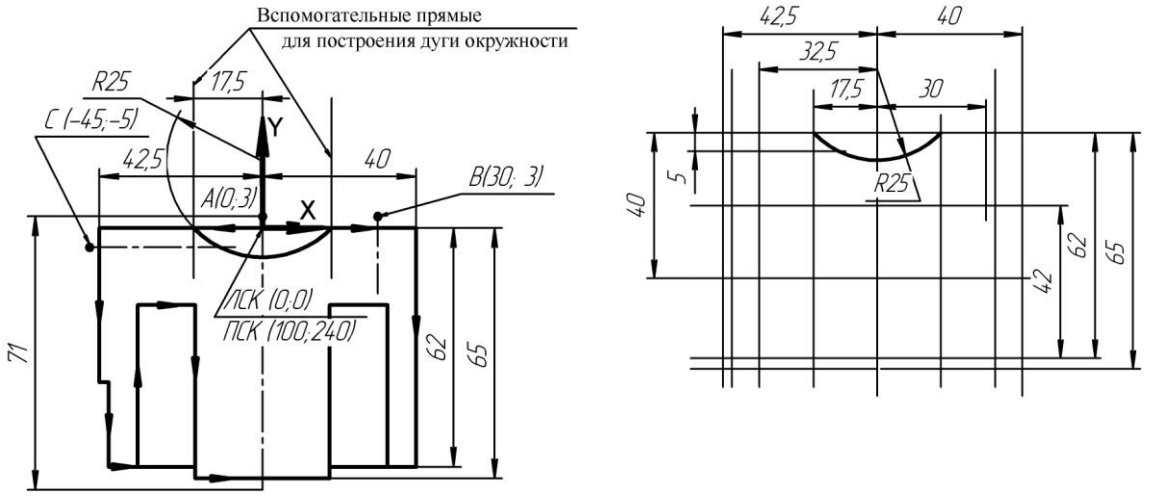
Для самостоятельной проработки всех разделов дисциплины студентам предоставляются различные справочные материалы и пособия [3, 4, 5, 6, 7, 8], как в печатном варианте, так и в электронном.

Помимо интенсивной аудиторной работы, решение проблемы усвоения планируемого объема информации, на взгляд авторов, заключается в активном и грамотном использовании при выполнении индивидуальных графических работ возможностей программного комплекса, настройки которого и многочисленные приложения основаны на стандартах Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) [9]. Применение системы как инструмента для получения качественной графической документации, а также использование ее библиотек на базе электронных справочников позволяет сократить трудозатраты и, в целом, значительно улучшить конструкторскую подготовку студентов.

Для более глубокого изучения структуры чертежно-графического модуля системы и приобретения навыка работы с его инструментами студентам предлагается выполнить ряд упражнений самостоятельно. Для этих целей преподавателями кафедры подготовлено учебное пособие, в котором наряду с кратким описанием возможностей программы и рекомендациями по их практическому применению, включены упражнения, представляющие собой пошаговые инструкции по выполнению тренировочных заданий, которые содержат типовые элементы графических и текстовых конструкторских документов (пособие размещено на сайте кафедры).

Первое упражнение «Введение в систему КОМПАС-График» направлено на изучение интерфейса системы, панелей инструментов, различных настроек системы, созданию, сохранению и печати документов. Рассматривается ряд принципиальных отличий алгоритма создания чертежа на компьютере от традиционного черчения на кульмане.

Второе и третье упражнения предназначены для освоения основных команд системы и методов создания чертежей деталей. Выполняя эти упражнения, студенты отрабатывают различные приемы получения изображений (рис. 1), знакомятся с некоторыми библиотеками системы КОМПАС и принципами работы с ними (рис. 2). Ниже приведен фрагмент одного из упражнений пособия (табл. 1). Форма упражнений позволяет самостоятельно шаг за шагом изучать структуру системы и приобретать навык работы в ее среде.



а) Координатный *б*) Метод вспомогательных линий

Рис. 1. Методы создания контура чертежа

Четвертое, пятое и шестое упражнения содержат инструкции по использованию таких сервисных возможностей системы, как послойное конструирование изделия, применение фрагментов в формировании чертежа, изменение масштаба изображения.

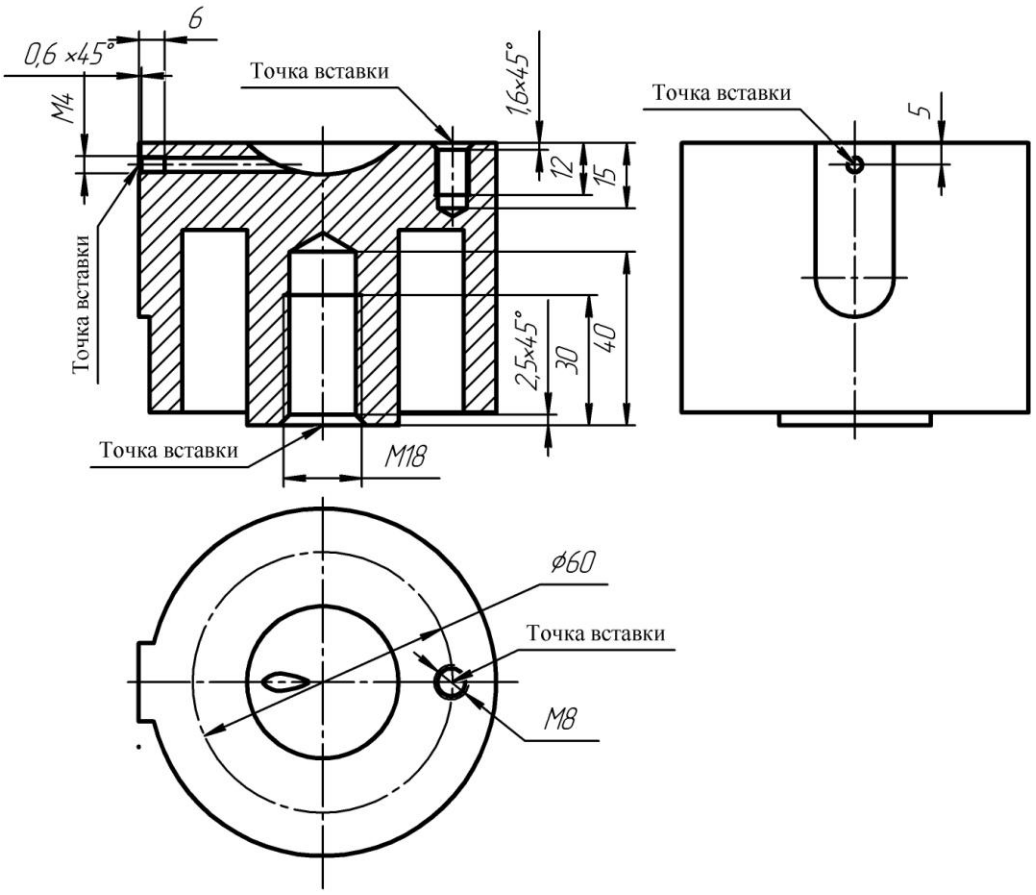


Рис. 2. Фрагмент чертежа детали

Седьмое упражнение знакомит с приемами создания параметрических объектов и особенностями работы с ними, позволяет понять суть библиотечных элементов системы и, в дальнейшем, формирования моделей для собственной библиотеки.

Выполнив восьмое упражнение, студенты научатся разрабатывать сборочные чертежи, используя возможности конструкторской библиотеки системы КОМПАС при изображении стандартных крепежных элементов. На рис. 3 представлены этапы формирования изображения шпилечного соединения на базе библиотеки стандартных изделий системы. В процессе выполнения этого упражнения студенты не только знакомятся со структурой и содержанием библиотеки, но и приобретают начальные навыки конструирования, «собирая» стандартные соединения из их компонентов в определенной последовательности. Устанавливая в опциях диалоговых окон запрашиваемые системой параметры (диаметр резьбы, шаг резьбы, длина шпильки и др.), студенты лучше понимают их значение и взаимосвязь. Так, например, при выборе в диалоговых окнах резьбового отверстия и шпильки разных значений шага резьбы, на чертеже нельзя получить правильное изображение резьбового соединения.

Таблица 1. Фрагмент упражнения

Использование прикладной библиотеки Компас

1. Откройте файл «Цилиндр направляющий».

2. На главном виде выполните изображение глухого резьбового отверстия *М18*. Для этого щелкните на кнопке с пиктограммой **Менеджер библиотек** на *Стандартной панели* и вызовите *прикладную библиотеку КОМПАС* (папка **Прочие**). В папке *Резьбовые отверстия* из перечня резьбовых отверстий выберите *Глухое отверстие* и двойным щелчком откройте окно **Отверстие резьбовое глухое с фаской**. В диалоговом режиме назначьте параметры этого отверстия. От предложения *Ось рисовать* следует отказаться, так как ось на чертеже уже имеется. Установите фантом изображения глухого отверстия на главном виде, указав точку вставки и задав на панели свойств угол поворота 90°.

3. Изобразите резьбовое отверстие *М4* на главном виде, а затем на виде слева. Для изображения отверстия на главном виде выберите из перечня папки *Резьбовые отверстия Сквозное отверстие с фаской* и придайте ему длину нарезанной части (поле **Глубина**) 6 мм. Продлите основные линии отверстия до очерка сферы (команда *Выровнять по границе*). Проведите линию ограничения длины резьбы. Для изображения отверстия на виде слева выберите из перечня надпись *Внутренняя резьба*. Придав требуемые значения параметрам отверстия, вставьте его в чертеж.

4. Изобразите на главном виде резьбовое отверстие *М8*.

5. На виде сверху изобразите его горизонтальную проекцию.

6. Используя команду *Копия по окружности* панели *Редактирование,* постройте недостающие резьбовые отверстия на виде сверху.

7. На виде сверху постройте линию пересечения сферы с цилиндром по четырем опорным точкам, используя команду *Кривая Безье* (инструментальная панель *Геометрия*).

8. Выполните штриховку. Сохраните файл.

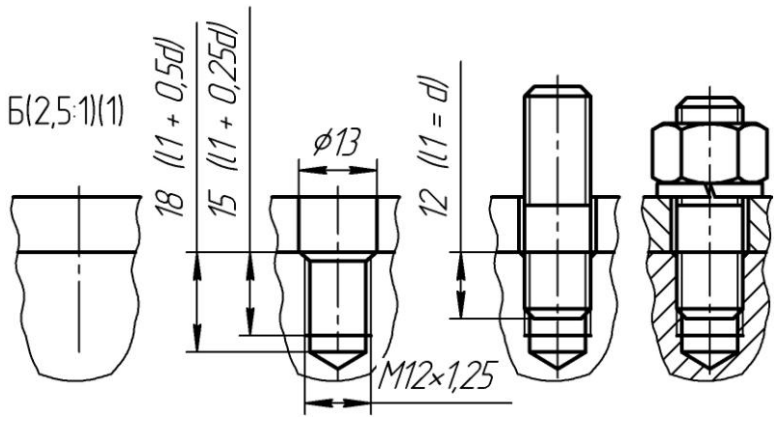


Рис. 3. Формирование изображения шпилечного соединения

Девятое и десятое упражнения предназначены для приобретения навыка составления спецификации, как в ручном, так и в автоматизированном режиме. Полученные навыки используются непосредственно при выполнении курсового проекта «Разработка конструкторской документации на техническое устройство по схеме,

описанию и чертежам деталей».

Предусмотрен промежуточный контроль освоения студентами рассматриваемых в упражнениях функциональных возможностей системы. Один из вариантов тестовых заданий представлен в таблице 2. Для успешного выполнения задания необходимы не только знания системы Компас и владение навыками работы в ней (методиками построения контура детали, настройки элементов системы, возможностей управления масштабом изображения и масштабирования чертежа, использования прикладных библиотек и текстовых шаблонов), но и основ начертательной геометрии. Таким образом поддерживается взаимосвязь разделов курса инженерной графики.

Отметим, что выполнение предложенного комплекса заданий – лишь первый этап обучения студентов компьютерным технологиям создания конструкторской документации. Приобретенные знания, умения и навыки работы в среде системы КОМПАС-График будут востребованы при изучении современных средств трехмерного моделирования, в частности, на базе соответствующего модуля системы КОМПАС-3D.

Выполнение чертежей с использованием компьютерных средств, несомненно, более привлекательно для студентов, по сравнению с традиционным черчением. Немаловажно и создание условий для актуализации интеллектуального потенциала студентов, а также формирование положительной мотивации [10]. Увлеченные студенты самостоятельно осваивают функции системы, не предусмотренные для изучения программой курса, и с удовольствием участвуют в олимпиадах по компьютерной графике, как внутривузовских, так и региональных [11, 12], которые ежегодно проводятся в Санкт-Петербурге.

Полученный опыт позволит учащимся быстро освоить и более сложные графические программные продукты, используемые на предприятиях различных отраслей промышленности, в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях.

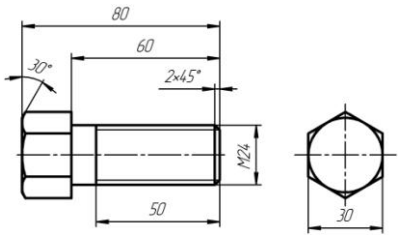
В заключение хочется отметить, что особенностью учебного процесса по дисциплине «Инженерная графика» всегда являлась высокая степень индивидуализации обучения, обусловленная персональным характером графических заданий, а также значительная трудоемкость выполнения и проверки этих заданий.

При комплексном подходе обучения студентов инженерной и компьютерной графике проблема трудоемкости проверки графических работ и контроля знаний становится еще более актуальной. Проверка электронного чертежа заметно повышает нагрузку на зрение. Невозможность зачастую увидеть весь чертеж на экране монитора в масштабе, удобном для работы, увеличивает время проверки чертежа. Наконец, трудности, возникающие при фиксировании замечаний преподавателя в электронном документе и, как следствие, несвоевременное исправление ошибок увеличивают в не-

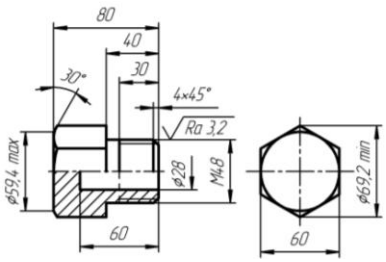
сколько раз число обращений студентов за консультацией.

Таблица 2. Вариант тестового задания

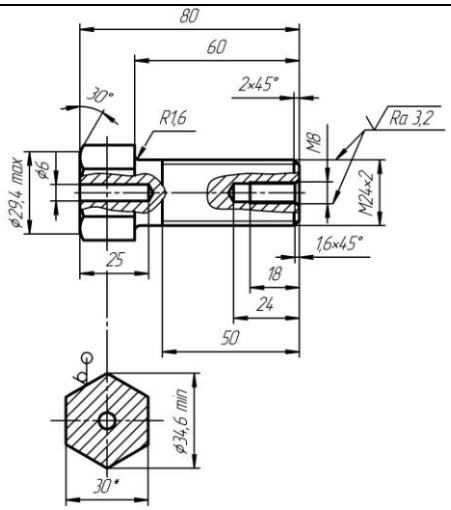
№	Задание	Проверяемые навыки работы в системе	Время выполнения
1	Создать фрагмент. Сохранить в свою папку. Произвести построения согласно **Фиг. 1**. Размеры разместить на специально созданном для этого слое «Размеры» (цвет – красный).	Команды панелей *Геометрия и Размеры,* в частности: *Многоугольник, Осевая по двум точкам, Фаска.* Создание и настройка слоя.	Фиг. 1: 5 - 15 мин
2	Настроить сохранение новых документов по *Обозначению+Наименованию.* Создать и оформить на основе фрагмента чертежи деталей согласно фиг. 2-4. Формат А4. Чертежи фиг. 3, 4 выполнить в масштабе 1:2. Размеры и обозначения разместить на слое «Размеры». Настроить размещение размеров строго в соответствии с рисунками. Сохранить после заполнения полей *Обозначение и Наименование* основной надписи.	Вставка фрагмента. Команды панелей *Геометрия, Редактирование, Обозначения, Размеры.* **Фиг. 2**: менеджер библиотек - вставка глухого резьбового и гладкого отверстий; вставка неуказанной шероховатости (Ra 6,3), технических требований (настройка размещения), настройка отображения размеров и обозначений (работа с панелью свойств - выбор нужных режимов), основная надпись – использование текстовых шаблонов. **Фиг. 3**: *Масштабирование,* управление масштабом изображения (виды), *Деформация сдвигом*. **Фиг. 4**: оформление выносного элемента (создание вида), *Конструкторская библиотека*; построения с помощью вспомогательных прямых.	Фиг. 2: 20 - 30 мин Фиг. 3: 20 - 30 мин Фиг. 4: 15 - 20 мин



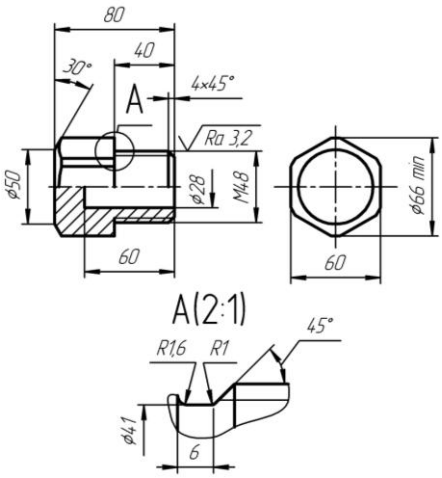
Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 2



Фиг. 4

Частично эта проблема решается предварительным выполнением чертежа в эскизном варианте и промежуточными распечатками его электронной версии. В курсовом проектировании выполнение эскизного варианта компоновки сборочного чертежа является обязательным этапом работы над проектом. Это позволяет преподавателю оценить самостоятельность работы студента уже на первом этапе проектирования и снизить вероятность тиражирования готовых вариантов заданий.

Анализ проблем, возникающих в учебном процессе при изучении дисциплины «Инженерная и компьютерная графика», позволяет, по мнению авторов, рекомендовать в нормах расчета учебной нагрузки ограничить количество студентов в группе на одного преподавателя (не более восьми) и увеличить количество часов, отводимое для консультаций (от 1 до 2-х часов на студента в семестр).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волошинов Д.В., Иванова Л.Б., Юрова С.А. Об особенностях и перспективах преподавания дисциплин инженерно-графического цикла в условиях действия федеральных образовательных стандартов третьего поколения на кафедре прикладной геометрии и дизайна // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 35-47.
2. Использование технологий 3-D моделирования для изучения пространственных форм в курсе "Начертательная геометрия" / Н.С. Иванова [и др.] // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке: материалы XVI Международной научно-методической конференции 13-14 февраля 2009 года, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 314-315.
3. Иванова Л.Б., Крыжановская И.М., Маркова Т.В. Инженерная графика. Разработка конструкторской документации на сборочную единицу: метод. указания. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 63 с.
4. Инженерная графика. Основы оформления конструкторской документации: учеб. пособие / Иванова Л.Б. [и др.]]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 140 с.
5. Инженерная графика. Разъемные соединения: учеб.пособие / Ю.Я. Андрейченко [и др.] — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 90 с.
6. Маркова Т.В., Крыжановская И.М. Инженерная графика. Обозначение шероховатости поверхностей на чертежах: учебное пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 45 с.
7. Меркулова О.В., Тарелкин С.М., Юрова С.А. Инженерная графика. Сборка по схеме: учебно-методическое пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 79 с.

8. Самсонов В.В., Красильникова Г.А. Автоматизация конструкторских работ в среде Компас- 3D: учеб. пособие. – М.: Изд-во «Академия», 2009. – 224 с.
9. Единая система конструкторской документации. Общие правила выполнения чертежей: сборник. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 384 с.
10. Афанасьева И.Б., Иванова Н.С., Смирнова И.С. Управление педагогическим процессом при обучении начертательной геометрии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб., 2011. – №1(117): Наука и образование. – С. 302-308.
11. Олимпиада как одна из форм повышения уровня знаний студентов / Н.С. Иванова [и др.] // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке: материалы XV Международной научно-методической конференции : 15 -16 февраля 2008 года, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – Т.1. – С. 212-213.
12. Олимпиады по графическим дисциплинам — этап формирования инженерного интеллекта / Н.С. Иванова [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 72-81.

УДК 37.013.32

А. Д. Касатиков, А. М. Лейбов, О. М. Осокина

ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ IT-КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ-ТЕХНОЛОГОВ



Алексей Дмитриевич Касатиков
Кузбасская государственная педагогическая академия
Россия, Новокузнецк
Тел.: 8(3843) 74-03-75



Алексей Михайлович Лейбов, к.п.н.
Новосибирский государственный педагогический университет
Россия, Новосибирск
Тел.: 8(383) 244-23-68



Олеся Михайловна Осокина, к.п.н.
Кузбасская государственная педагогическая академия
Россия, Новокузнецк
Тел.: 8(3843) 74-03-75

Аннотация

В работе рассмотрены некоторые вопросы оценки сформированности IT-компетенций студентов-технологов. Представлены результаты сформированности IT-компетенций студентов-технологов за последние два года.

Ключевые слова: IT-компетенции, оценка сформированности компетенций

A.D.Kasatikov, A.M.Leibov, O.M.Osokina

ESTIMATING IT-COMPETENCE OF TECHNOLOGIST STUDENTS ANNOTATION

A.D.Kasatikov[1], A.M.Leibov[2], O.M.Osokina[1]
[1]Kuzbass State Pedagogical Academy, Russia, Novokuznetsk
[2]Novosibirsk State Pedagogical University, Russia, Novosibirsk

Abstract

There are some questions about estimating it-competence of technologist students. The result are given here have been gathering for the last two years.

Key words: IT-competence, the evaluation of formation of competencies

Мониторинг и оценка качества обучения определены как одна из со-

ставляющих современной системы образования. Перед вузами стоят задачи обеспечивать гарантии качества образования, заключающиеся в разработке и применении объективных способов оценки уровня знаний, умений и навыков студентов, компетенций выпускников на основе четких согласованных критериев. Оценка качества подготовки студентов и выпускников при этом должна включать результаты их текущей, промежуточной и итоговой аттестации.

Сложившаяся на сегодняшний день система оценки качества учебных достижений студентов трудно совместима с требованиями модернизации образования, так как направлена на внешний контроль и оценивает только репродуктивный уровень усвоения. Поэтому одним из основных условий модернизации системы контроля и оценки учебных достижений студентов является введение новых методов, форм и средств оценки динамики продвижения студентов в учебной и внеучебной деятельности.

В нашей стране пока нет единого инструментария, позволяющего измерить и оценить результаты обучения и уровень сформированности приобретенных компетенций, хотя на международном уровне он существует (например, TIMSS, PISA, CIVIC Education Project) [8], которыми российские студенты при желании могут воспользоваться.

В зарубежной практике принято выделять три основных подхода к определению и введению в практику образования компетентностной трактовки качества результатов обучения [8]. Эти подходы появились независимо друг от друга сначала в США, затем в Великобритании и в последнюю очередь во Франции и Германии.

Обсуждая американский подход к компетентностной трактовке качества результатов обучения часто используется термин «поведенческий подход», подчеркивающий четкую ориентацию результатов образования на способность к их применению на практике после окончания учебного заведения. В США для оценивания компетенций стали разрабатывать компетентностные тесты, позволяющие предсказывать эффективность в работе после окончания обучения с высокой прогностической валидностью [8].

В отличие от США, где кластеры компетенций нацелены исключительно на поведенческие характеристики результатов обучения, связанные со спецификой будущей профессиональной деятельности выпускника учебного заведения, в Великобритании охватываются функциональные характеристики качества базисных знаний и результатов обучения. Для Великобритании характерно стремление к целостности и функциональности путем интегрирования знаний, ценностей, понимания и навыков, присущих тем, кто сформировался как профессионал после окончания срока обучения.

Во Франции оценка на основе компетентностного подхода строится по двум направлениям: личностное, сосредоточенное на характеристике поведения каждого обучаемого, и коллективное, нацеленное на построение

модели компетенций, необходимых для эффективной организации работы коллективов и участия в этой работе в качестве одного из членов коллектива [8].

Особенность подхода в Германии в начале каждого плана помещается совокупность компетенций действия, специфических для каждого предмета и определяющих в основном приоритетные области изучения, а также планируемые к усвоению знания, умения и навыки.

Зарубежный опыт оценивания также рекомендует применять для описания результатов обучения различные уровневые таксономии, например, такие как таксономии Б.Блума [12], Д.Бокка, Дж. Гилфорда [13, 14].

Б.Блум выделяет шесть уровней усвоения содержания образования: знание, понимание, применение, анализ, синтез, оценка.

Д. Бокк и Дж. Гилфорд разработали трехмерную модель таксономии, позволяющую рассматривать иерархию целей и уровней обучения и выделили такие уровни: содержание, продукты и операции, каждый из которых включает виды и категории.

В России наибольшее распространение получили таксономии Беспалько В.П. [1] и Симонова В.П. [10].

Беспалько В.П. разработал таксономию, содержащую четыре уровня усвоения: уровень узнавания, деятельность в стандартной ситуации, деятельность в нестандартной ситуации, деятельность в новой области (исследовательская). Данная классификация является иерархической, и каждый последующий уровень, включает предыдущие.

Симонов В.П. выделил пять уровней усвоения, каждый последующий уровень усвоения включает в себя все предыдущие: различение (распознавание) – уровень знакомства, характеризующий низшую степень обученности. Учащийся, находящийся на этом уровне обучения отличает объект, процесс, явление или действие от их аналогов, только когда они представлены в готовом виде с их внешними характеристиками; запоминание – уровень обученности, на котором учащийся может пересказать содержание материала; понимание – уровень обученности, на котором учащийся не только воспроизводит формулировку, а может объяснить и привести примеры; простейшие умения и навыки (репродуктивный уровень) – уровень обученности, на котором учащийся может применить полученные теоретические познания на практике, т.е. выполнять практические работы по шаблону, решать задачи по аналогии и т.п.; перенос – творческий уровень обученности – реализации усвоенного теоретического материала на практике с применением новых оригинальных подходов к решению поставленных задач.

Представляет интерес теория компетентностей С.Торпа и Дж.Клиффорда [11], которые выделяют следующие ступени научения:

- бессознательная некомпетентность - вам неизвестно, что вы не знаете что-либо. Вы находитесь на уровне «Я не знаю о том, ЧТО я не знаю».

- осознанная некомпетентность - вы приобретаете знание о своем «незнании». Это стадия «Я знаю о том, ЧТО не знаю»;
- осознанная компетентность - часто на этой стадии вы в точности копируете действия вашего учителя. В каждый момент времени вы осознаете то, что делаете, ибо вы «знаете, о том, ЧТО знаете»;
- бессознательная компетентность - ваши знания и умения использовались столь часто, что стали «привычками». Выполняя соответствующие действия, вы уже не испытываете нужды в продумывании каждого последующего шага, ибо алгоритм действия заложен в бессознательное (или подсознательное). Теперь вы можете сказать: «Я не знаю о том, ЧТО я знаю».

Теория компетентностей С.Торпа и Дж.Клиффорда используется для оценки сформированности различных видов компетенций в общеобразовательных и профессиональных учреждениях.

Так, Сергеева Л.В. [9] использует теорию компетентностей С.Торпа и Дж.Клиффорда для оценки уровня информационно-технологической компетентности выпускников школы.

Авторами [7] на основе теории компетентностей осуществляется оценка информационно-технологических компетенций обучающихся 2-11 классов.

Т.В.Базайкина и А.Н.Ростовцев [4] применяют теорию компетентностей С.Торпа и Дж.Клиффорда для оценки сформированности компетенции студентов педвуза. Они отмечают, что, находясь на ступени «бессознательная некомпетентность», студент, приступая к изучению новой дисциплины, не понимает, каким образом данная информация может использоваться в его будущей профессиональной деятельности, или какие из ранее полученных знаний могут пригодиться ему при изучении данного курса, не подозревает о собственной некомпетентности. При осознанной некомпетентности студент, приступая к решению практических задач или проходя практику на производстве, в школе, начинает понимать, что он не умеет пользоваться полученной информацией. Находясь на ступени «осознанная компетентность» студент уже осознает свои действия и понимает границы своей компетентности. Студенты, вышедшие на ступень «бессознательная компетентность», демонстрируют наиболее высокий уровень профессиональной компетентности.

В данной работе мы рассмотрим возможность оценки уровня сформированности IT-компетенций студентов-технологов. В последние годы формированию этих компетенций уделяется большое внимание, как в сфере общего образования, так и в сфере начального, среднего и высшего профессионального образования. Это согласуется со стандартом Европейского образования, в котором IT-компетенции относится к «ядерным компетенциям», т.е. к «национальным ключевым квалификациям». Но, несмотря на это, ввиду сложности, масштабности содержания формирования

компетенций в области информационных технологий остается недостаточно изученным.

Формирование выделенных нами видов IT-компетенций студентов (информационно-коммуникационная, графическая, пользовательская) осуществлялось на основе разработанной структурно-функциональной модели [6]. Выбор именно этих видов IT-компетенций студентов-технологов обусловлен тем, что одним из требований к специалистам, которые будут в ближайшее время востребованы на рынке труда, является владение и использование современных информационных технологий, в т.ч. в графическом образовании [2, 3]. В связи с этим нами были определены наиболее приоритетные виды IT-компетенций для студентов-технологов с учетом специфики их специальности и запросов работодателей.

Для студентов-технологов были разработаны программы и содержание факультативных курсов «Трехмерная графика в техническом проектировании», «Интерактивные технологии в образовательной области «Технология», «Создание электронных дидактических материалов», «Компьютерные технологии в художественном оформлении» и внедрены в воспитательно-образовательный процесс [6].

Оценка уровня сформированности IT-компетенций осуществлялась на основе теории компетентностей С.Торпа и Дж.Клиффорда, позволяющей оценить ступень научения каждого студента и таксономия В.П.Симонова, в полной мере характеризующая возможности реально оценить достижимую эффективность подготовки студентов [5]. В таблице 1 представлены показатели оценки каждого вида IT-компетенций студентов-технологов и наименование дисциплин направленных на их формирование.

Таблица 1. Показатели оценки IT-компетенций студентов-технологов

Вид IT-компетенции	Наименование дисциплин	Показатели
Информационно-коммуникационная	«Информационные технологии», «Информатика», «ИКТ в производстве и учебном процессе», «Проектирование информационных систем», «Проектирование электронных дидак-	использование основных методов, способов и средств получения, хранения, переработки информации; готовность работать с компьютером как средством управления информацией; способность работать с информацией в глобальных компьютерных сетях; понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, создание гипертекстовых документов с использованием

	тических материалов в ООТ»	Web-редакторов, языка разметки гипертекста HTML, PHP, использование сценариев JavaScript, ориентирование в информационных ресурсах, управление информационными потоками; анализ и оценка информации с позиции ее свойств и значимости; публикация Web-сайта в сети Интернет и индексация в поисковых системах; использование информационных и коммуникационных технологий для построения открытой системы образования; проектирование, разработка и использование в школьном образовательном процессе информационных ресурсов учебного назначения; использование дистанционных технологий в образовании как средства расширения информационного образовательного пространства
Пользовательская	«Информационные технологии», «Информатика», «ИКТ в производстве и учебном процессе», «Проектирование информационных систем», «Трехмерная графика в техническом проектировании», «Интерактивные технологии в ООТ»	представление материала со сложной структурой с использованием средств ИТ; знание классификации программного обеспечения и области применения каждого вида программ; умение работать с файлами в командном режиме и в популярных операционных системах; осуществление сервисного обслуживания ПК; владение текстовыми редакторами Microsoft Office и Open Office: структурирование текста, работа со стилями, вставка формул, оглавления, сносок; владение презентационными пакетами Microsoft Office и Open Office: разработка образцов слайдов, создание сложной анимации, работа с траекторией, настройка гиперссылок и всплывающих подсказок, в т.ч. на фрагменты изображений; владение табличными редакторами в Microsoft Office и Open Office: работа с листами, вставка формул, форматирование, адресные и относительные ссылки, работа с основными функциями, создание диаграмм, вложенные функции, умение использовать технологии обработки числовых данных (подбор параметра, поиск решения) и условное форматирование; создание и выполнение базовых операций над объектами; готовностью к проектированию, применению комплекса дидактических средств; владение программным

		продуктом визуальной архитектуры ArCon; владение СУБД: проектирование БД на основе декомпозиции, приведение баз данных к 1НФ, 2НФ, 3НФ, нормальной форме Бойса-Кодда, владение пакетами BPwin и Erwin; использование языка DDL для создания структуры БД на основе физической модели данных, основы СУБД MySQL и PostgreSQL; особенности использования среды разработки Delphi для создания клиент-серверных приложений: работа с презентационным пакетом Smart Nortebook: работа с различными видами объектов, коллекцией, средствами Smart и интерактивными средствами LAT; использование мультимедиа и коммуникационных технологий для реализации активных методов обучения и самостоятельной деятельности учащихся; использование техники аудиовизуальных и интерактивных средств обучения; использование САПР
Графическая	«Начертательная геометрия и инженерная графика», «ИКТ в производстве и учебном процессе», «Проектирование информационных систем», «Трехмерная графика в техническом проектировании»,	осознание и осмысление значимости графической подготовки для решения конкретных учебно-профессиональных задач; формирование готовности осуществлять профессиональную деятельность, реализуя в ней приобретенный графический потенциал; формирование технического типа мышления, предполагающего в основе хорошо развитое пространственное мышление, предопределяющее творческий потенциал выпускника; формирование мотивационно-ценностного отношения к необходимости развития профессионально-личностных качеств и способностей средствами графической подготовки; владение необходимым объемом конструкторско-графических знаний, умений и навыков, взятых в единстве и взаимодействии с профессиональной направленностью

При проектировании инструментария мы исходили из того, что компетенции формируются и проявляются в деятельности.

В результате оценки уровня сформированности IT-компетенций студентов-технологов последнего года обучения были получены результаты за 2011-2012 уч.год (рис. 1) и за 2012-2013 уч.год (рис. 2).

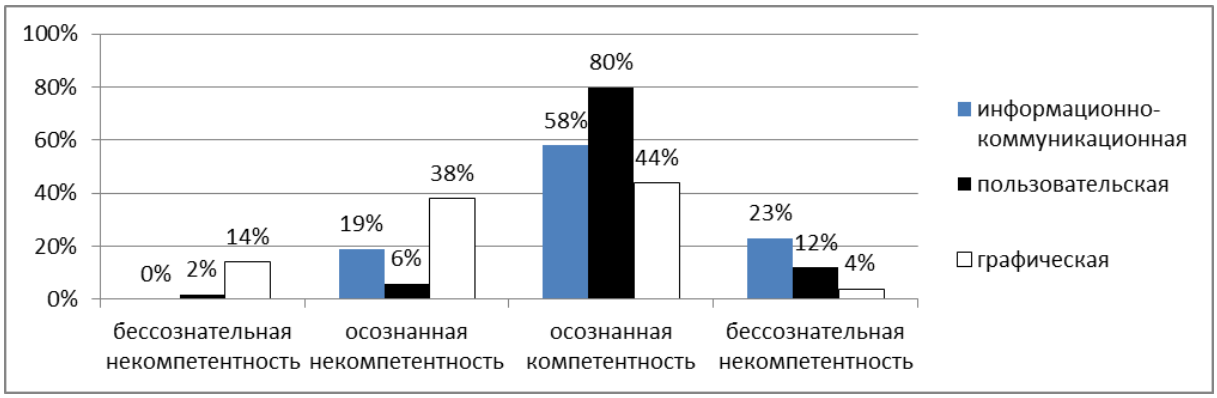


Рис. 1. Результаты оценки уровня сформированности IT-компетенций студентов-технологов последнего года обучения (2011-2012 уч.год)

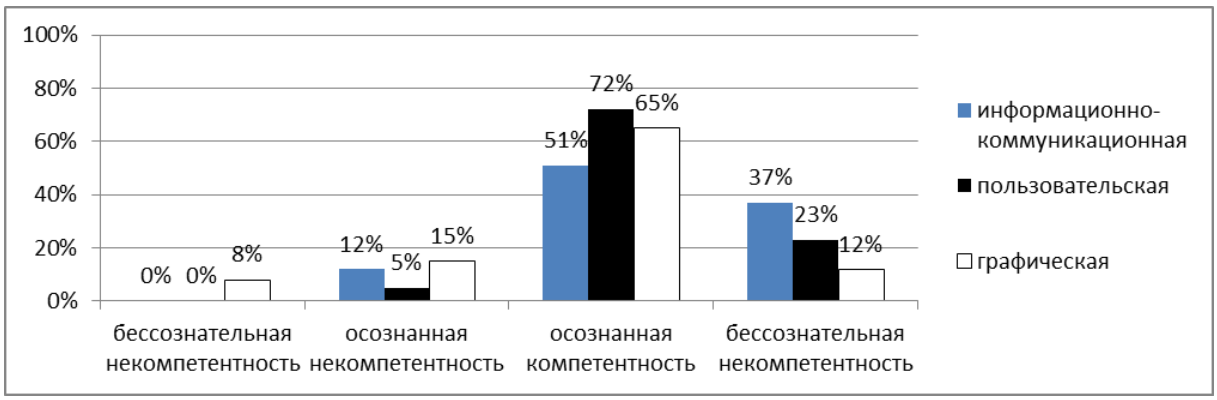


Рис. 2. Результаты оценки уровня сформированности IT-компетенций студентов-технологов последнего года обучения (2012-2013 уч.год)

Разработанный на основе теории компетентностей С. Торпа и Дж. Клиффорда и таксономии В.П. Симонова критериально-оценочный аппарат с достаточно высокой степенью достоверности позволяет оценить уровень сформированности всех видов IT-компетенций студентов-технологов, что дает сведения для оптимизации и индивидуализации процесса обучения и в свою очередь способствует повышению качества образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалько В.П., Татур Ю.Г. Системно методическое обеспечение учебно-воспитательного процесса подготовки специалиста. - М.: Высшая школа, 1989. - 149 с.
2. Вольхин К.А., Лейбов А.М. Проблемы формирования графической компетентности в системе высшего профессионального образования / Философия образования. - 2012. - №4. - С.16-22

3. Каменев Р.В., Крашенинников В.В. Концепция применения систем автоматизированного проектирования в учебном процессе педагогического вуза//Сибирский педагогический журнал. - 2012. - № 5. - С.30-34
4. Компетентностный подход в образовании Т.В.Базайкина [и др.]// Технолого-экономическое образование: достижения, инновации, перспективы: Сб. статей X Международной научно-практической конференции. - Тула: Изд-во ТГПУ им. Л.Н.Толстого, 2009
5. Лейбов А.М., Осокина О.М. Критерии и показатели оценки уровня сформированности IT-компетенций студентов ФТП и ТЭФ//Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Гуманитарные и экономические науки. - Новокузнецк: СибГИУ. - 2012. - С.171-175
6. Осокина О.М. Модель формирования IT-компетенций студентов ТЭФ // Актуальные проблемы технологического образования: труд, талант, творчество. - Мозырь, 2013
7. Осокина О.М., Ростовцев А.Н. Оценка уровня сформированности IT-компетенций учащихся школы менеджмента и маркетинга по ступеням научения //Социальная политика и социология. - 2009. - № 10. - С.208-215
8. Проектирование компетентностно-ориентированных основных образовательных программ, реализующих федеральные государственные образовательные стандарты высшего профессионального образования: методические рекомендации для организаторов проектных работ и профессорско-преподавательских коллективов вузов / Авт. Сост. И.В. Осипова, О.В.Тарасюк. – Екатеренбург: РГППУ, 2009. - 100 с.
9. Сергеева Л.В. Формирование информационно-технологической компетентности учащихся гимназии Дисс. … канд. пед. наук. – Самара, 2005. - 191 с.
10. Симонов В.П. Педагогический менеджмент: 50 НОУ-ХАУ в области управления образовательным процессом. Учебное пособие. 2-ое изд. испр. и доп. - М., 1997. - 264 с.
11. Торп С., Клиффорд Дж. Коучинг: руководство для тренера и менеджера. – СПб: Питер, 2004. – С.26-27
12. Bloom, B.S. Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals. Handbook I: Cognitive Domain. N.Y., 1956
13. De Block, A. Taxonomie van Leerdoeleu. Amsterdam: Standart Wetenschappelijke Uitgererij, 1975Gilford, J.P. The Nature of Human Intelligence.N.Y.: David MeKey Co, 1967
14. Gilford, J.P. The Nature of Human Intelligence.N.Y.: David MeKey Co, 1967.

УДК 621.7

В.А. Клевцов, В.В. Максаров

О РОЛИ МЕТОДОЛОГИИ В РАЗВИТИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ И ОБУЧЕНИИ



Клевцов В.А., канд. техн. наук, доцент
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(960)2517594 E-mail: sapr2k8@yandex.ru



Максаров В.В., д-р техн. наук, профессор
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8 (921)7593504 E-mail: maks78.54@mail.ru

Аннотация

В работе представлены некоторые итоги реализации принципов системности, преемственности, унификации и автоматизации, как методологической основы развития базы технических знаний (БТЗ) и методики обучения. В качестве объекта иллюстрации выбран сегмент БТЗ, именуемый «Основы технологии машиностроения». Совершенствование в нём в результате многолетней научно-педагогической деятельности автора в области технического проектирования и его автоматизации (САПР) коснулись понятийной и процедурной сторон. Результаты опробированы и внедрены в научной и педагогической сферах.

Ключевые слова: база знаний, методология, принципы, системность, преемственность, унификация, автоматизация, структура, теория, техническое проектирование, интегративное свойство, семантика, дедукция.

V.A. Klevtzov, V.V. Maksarov

ON THE ROLE OF THE METHODOLOGY IN THE DEVELOPMENT OF TECHNICAL KNOWLEDGE AND TRAINING

V.A. Klevtzov[1], e-mail: sapr2k8@yandex.ru;
V.V. Maksarov[1], e-mail: maks78.54@mail.ru.
[1]National Mineral Resources University (Mining University), Russia

Abstract

The paper presents some results of implementation of the principles of system, succession, unification and automatization, as a methodological basis for development of technical knowledge base (BTZ) and teaching methods. BTZ segment called "Fundamentals of Mechanical Engineering" was chosen as an illustration of the subject matter. Improvements in said segment after years of author's research and teaching in the field of technical design and automation (SAPR) have affected conceptual and procedural sides of the problem. Results were tested and implemented in scientific and educational spheres.

Key words: knowledge base, methodology, principles of system, succession, unification, automatization, structure, theory, technical engineering, integrative property, semantics, deduction.

Проблема, озвученная в названии доклада, была сформулирована автором ещё в 60-е годы прошлого столетия как задача познания и поиска ответа на вызовы времени. Так, уже тогда в статусе Государственной программы стояла задача комплексной автоматизации производства, включая и техническую его подготовку. В решение этой весьма сложной научно-технической проблемы были вовлечены представители научно-педагогического сообщества Высшей школы и автор был одним из таковых.

По заданию и договорам с промышленностью решалась проблема создания САПР технического проектирования. С позиций знания проблемы можно утверждать, что САПР это всего лишь инструмент решения, ассоциативно представляющий собой надводную часть айсберга, подводную часть которого образует БТЗ. Именно её состояние и определяет успех решения задач технического проектирования и дальнейшего развития возможностей САПР и по сей день.

Подчеркнём здесь важный тезис, что нельзя строить «здание знаний» без подведения под него прочного методологического фундамента! Это аксиома, но подтверждаемая практикой и историей развития технических знаний.

Основа методологии, олицетворяемая упомянутым фундаментом была озвучена в составе четырёх принципов: системности, преемственности, унификации и автоматизации, с разных сторон комплексно затрагивающих рассматриваемую проблему, ещё в 60-е годы прошлого столетия в рамках решения Государственной задачи комплексной автоматизации производства.

Но провозглашение принципов это всего лишь первый шаг в поступательном направлении, ибо принцип это всего лишь «лозунг», который становится «руководством к действию» только после раскрытия его сущности и разработки концепции, методики, алгоритмов реализации. Вот почему при

выполнении научно-исследовательских работ по упомянутой выше тематике автором было уделено особое внимание проработке именно этих сторон проблемы и предложены оригинальные трактовки положений по каждому принципу применительно к условиям реализации в технической области знаний и с учётом их сделаны определённые шаги в сторону её развития.

Позднее, в начале 80-х годов эти разработки были внедрены и в образовательной сфере, подтвердив их значимость в научном и в педагогическом аспектах, что позволило по новому взглянуть на многие положения, традиционно излагаемые при обучении и по сей день, и считающиеся чуть ли не «классическими» в рассматриваемой проблемной области знаний и изменить преподавание как в методическом, так и в методологическом планах. Поэтому излагаемое здесь не «прожект» будущего, а реально внедрённые в практику подготовки специалистов приборо- и машиностроения научные положения с более чем двадцатипятилетней историей. Да, в этот период они непрерывно совершенствовались (у этого процесса нет предела!), подтверждая тем самым справедливость тезиса, что только в Высшей школе, с её ежегодным повторением процесса преподавания материала, должной оценкой результатов его восприятия, корректности излагаемых положений создаются объективные условия для разработки и непрерывного совершенствования теории проектирования информационных процессов, вообще, и технических объектов, в частности.

Рассматривая в педагогическом плане выдвигаемые предложения, скажем, что они непосредственно затрагивают извечные два универсальных вопроса педагогики: Чему учить? и как учить? Ответы на эти, скорее философские, вопросы в рассматриваемой области предопределены используемой методологией и особенно входящим в состав её основы принципом «системности», реализация которого в науке получила название «системного подхода», представляющего собой универсальную методологию познания и решения проблем.

Осуществление функционального аспекта последнего позволяет внести, кроме всего прочего, инновации и в методику преподавания использованием дедуктивного пути подачи и познания содержания изучаемой области знаний.

В качестве объекта иллюстрации выбран сегмент БТЗ, именуемый «Основы технологии машиностроения». Излагаемый здесь материал существенно отличается от традиционного его содержания и изложения даже в современной учебной литературе [7]. Но эти различия не есть отражение субъективного желания автора. Они сформировались объективно и естественно в результате многолетней научно-педагогической деятельности в этой области технических знаний и создания в ней САПР, иллюстрируя тем самым на практи-

ке «революционную» роль совершенствования методологии и методики в развитии знаний и познания их при обучении.

Оригинальность излагаемого проявляется уже во временной структуре и целевой направленности схемы подачи изучаемого материала в русле целенаправленного формирования ответов на поставленные уже в самом начале вопросы, ответы на которые во многом и составляют цели его познания.

Что же это за вопросы? Сформулируем их, используя приёмы построения спиралеобразной структуры системного исследования и познания проблемы, сопоставляя её при этом (всё познаётся в сравнении) с «традиционной» схемой и языком представления знаний.

Центральными понятиями рассматриваемой области знаний выступают ОБПР и ТП его изготовления. Эта связка, с учётом возможного разнообразия содержания обоих компонентов многократно тиражируется, подчёркивая сложность и универсальность проблемы и предопределяя тем самым важность единой методологии познания её существа и решения. Укрупнённую модель их взаимосвязи можно описать выражением соответствия:

$$\text{ОБПР} \overset{R}{\longleftrightarrow} \text{ТП} \qquad (1)$$

Здесь, ОБПР – символ информационной модели «детища» конструктора, создавшего и описавшего объект в конструкторской документации на этапе КПП (конструкторской подготовки производства), таким, каким он по замыслу создателя способен обеспечить исполнение предписанных ему техническим заданием функций.

Символ ТП здесь характеризует более ёмкое содержание, нежели обозначение только названия трудового процесса с его организационно-плановой структурой, отчего в начальный момент познания может и должен рассматриваться как «чёрный ящик». Раскрыть, изучить и описать входящие в него компоненты, их взаимосвязь и взаимодействие (в современном толковании сделать его прозрачным) – вот важнейшие цели развития знаний в технологическом сегменте БТЗ, описывающих «объект проектирования» и, соответственно, «объект освоения» их при обучении.

R – символ «оператора преобразования», имеющего две сущностных стороны проявления: материальную и информационную. С позиции первой, он отражает сущность ТП изготовления объекта, как процесса преобразования материи. Вторая сторона затрагивает преобразование информации в ходе проектирования самого ТП. Именно через этот информационный процесс проектант и осуществляет выход всех содержащихся в сегменте знаний в практику производства, подтверждая тем самым их практическую ценность. С позиций познания процедурного содержания оператора R его также можно назвать, но уже вторым «чёрным ящиком» проблемы. Уровень познания и описания его содержания (концепция, методика, алгоритм) предопределяют

как качество разработки, так и возможность, достаточность для успешной реализации принципа «автоматизации» при создании и развитии САПР в этой области, что свидетельствует о повышении в ней объёма «объективных знаний» и служит весомым показателем достижений в её развитии.

Выделение уже по результатам беглого анализа модели 1 двух «чёрных ящиков» позволяет конкретизировать содержание аналогичного числа стержневых вопросов познания в этой области:

1. Что такое ТП, как объект проектирования?

2. Каково содержание, методика, в идеале, алгоритм (его символ – оператор *R*) этого процесса?

Только системное исследование проблемы, выраженной на первом витке познания моделью 1, с комплексным использованием положений всех четырёх принципов развития позволяет перевести рассматриваемую проблему на новый, более высокий уровень знания и решения, повышая тем самым значимость таких достижений.

Комментируя сказанное, заострим внимание на преимуществе использования математических моделей (здесь модель 1 – частный пример), по сравнению с вербальными, что и предопределило необходимость широкого их использования в рамках системных исследований рассматриваемой здесь проблемы.

Некоторые полученные результаты были внедрены автором в научно-педагогических сферах ещё в 80-е годы прошлого столетия.(1) И только в первом десятилетии 21-го века появилась «официальная реакция» на вызовы и потребности времени пониманием значимости математического моделирования, как инструмента исследования и познания в технической области и необходимости изучения соответствующего математического аппарата в период обучения современного технического специалиста.

Упомянутая «реакция» проявилась во введении «сверху» в учебные планы некоторых специальностей соответствующих новых дисциплин.

Но опыт формирования представляемого содержания сегмента и продолжительного по времени его использования при обучении (2) дают основание утверждать, что только «реформирование» предметной области знаний на современной методологической основе (некоторые результаты которого отражены в материалах сегмента) и рассмотрение его результатов, как «объект изучения» способно повысить должное качество обучения и эффективность профессиональной деятельности носителей этих знаний. Осуществление же введения новых дисциплин, если они строятся на разной основе, не сможет обеспечить желаемого.

«Революционным локомотивом прогресса» в сфере БТЗ может быть только совершенствование методологической основы её комплексного разви-

тия и всемерное использование при преобразовании как каждой предметной области, так и интегративно всей БТЗ. Реализация этого тезиса предполагает критическую переоценку всего «багажа знаний» предметной области с позиции принятой методологии и трансформирования его с учётом потребности времени и уровня развития техносферы.

Расширяя сферу применения пожелания, можно утверждать, что реформы в образовании следовало бы начинать именно с унификации методологической основы построения и развития базы знаний, универсальной, доступной к использованию в любой области информационной сферы.

Суть её и содержание следовало бы изложить в специальной дисциплине, скажем, «Методологические основы построения и развития БЗ» и ввести её в состав дисциплин для изучения уже на 1 курсе для всех специальностей, подняв статус дисциплины до федерального уровня, а не просто «информации к сведению».

Ведь чтобы получить «весомый урожай на образовательной ниве» её необходимо надлежащим образом «подготовить к посеву». И таким «эликсиром плодородия» может быть только владение «методологией познания и решения проблем» обоими участниками образовательного процесса! Это кардинальный шаг в образовании и его следует сделать как можно быстрее!

В таком случае, столь желанные «модернизация и инновация» будут обеспечиваться реализацией методологических принципов к содержанию каждой проблемно-ориентированной области знаний по специальности. Но это мечта и остаётся только уповать на то, чтобы со временем всё же «из искры возгорелось пламя».

В качестве примера результата воздействия такой «искры» и предлагается рассматриваемый материал данного сегмента технологической области БТЗ. А чтобы понять суть инновации и роль методологии при этом, проведём анализ в сопоставлении двух подходов к построению и содержанию рассматриваемого сегмента и методики его изучения.

С методической стороны педагогического аспекта рассмотрение проблемы использования системного подхода позволяет создать и предложить в противовес «классической» схеме построения и изучения теоретической части технологического сегмента БТЗ, схему изложения и познания, образно говоря, «от противного».

Первое принципиальное различие схем состоит в том, что в основе «классической» лежит индуктивный, а предлагаемой – дедуктивный пути представления и познания проблемы. Отразить вторую, очень важную черту принципиального различия схем позволит тезис из кладези народной мудрости: «без цели ... и попутный ветер не поможет». Вот почему, в отличие от «классической» схемы, в которой практическая цель технологических знаний,

аккумулируемая в методике проектирования, раскрывается в конце цикла изучения, в предлагаемой схеме всё начинается именно с постановки этой цели, сформулированной в виде двух уже упомянутых выше центральных вопросов:

1. Что такое ТП, как объект проектирования?
2. Каково содержание процедур этого процесса?

При этом сам процесс изучения построен в форме системного исследования рассматриваемой проблемы, что предполагает не «проглатывание» уже готовых сведений, как в «классике», а добывание их в ходе дискретного спиралеобразного исследования, каждый шаг которого мотивирован предыдущими и общей целью исследования. В качестве объектов исследования используются примеры из практики, а алгоритм исследования реализует классический философский принцип развития: практика – теория – практика, как критерий истинности теоретических выводов.

Предложенная схема представления и изучения теоретической части технологического сегмента БТЗ не отвергает существующих достижений, описанных в «классике» в отдельных разделах, а «встраивает их в канву исследований», где их изучение становится мотивированным, что и требуется для лучшего освоения, как было сказано выше. Но это «встраиваение» не есть «механическое» заимствование их, а возможна и трансформация с учётом конструктивного критического анализа соответствия их содержания как понятийного, так и процедурного характеров современной методологической основе развития знаний и воззрений по каждой теме. При этом, если предлагаемая трактовка понятия, определения отличается от существующей даже регламентированной стандартом, излагаются обе версии для сопоставления, конструктивной критики и осознанного выбора целесообразной. Этим приёмом показывается, что в науке не должно быть места волюнтаризму, диктату, подавлению авторитетом. Знания преходящи и необходимо естественно вовремя осуществлять их преобразование или открытие новых сторон проявления свойств. Такова диалектика развития знаний, определяющая ход НТП!

Даже беглый анализ задач исследования позволяет подтвердить оригинальность предлагаемой схемы познания. Действительно, уже на первом витке исследования в рамках функционального его аспекта по укрупнённой модели (1) выявляется состав (сообщество) представителей техносферы, обеспечивающий указанное соответствие. Уже одно это позволяет дать частичный ответ на первый из двух центральных вопросов, увидеть сложность проблемы, единство выделенных образований, представленных на этом шаге исследования укрупнёнными моделями, и конкретизировать их последующими микро и макроисследованиями. Как уже отмечалось выше, используемая здесь методика предполагает широкое использование математического моде-

лирования, особенно понятий и процедур таких разделов дискретной математики, как теория множеств, графов, алгоритмов, математической логики, что предполагает изучение их в разумных пределах для каждого направления подготовки специалистов.

Новизна предлагаемого проявляется уже при сопоставлении составов (сообществ) выделяемых для изучения представителей техносферы в обоих подходах. Так, в «классике» состав объектов, охватываемых проблемой «проектирование ТП изготовления детали» (нижнего уровня иерархической структуры «Т-системы ОБПР»), представляется соответствием: деталь – технологическая система – ТП. При предлагаемом же подходе на этом же уровне имеет место расширение состава с изменением семантики его представителей, образующих множество функционально связанных системных образований: ТСД – ТСЗ – <$ТСО_i$> – ТП. Символ и модель каждого из них "вытекает» из самого понятия «система», функции её и необходимости отражения в ней обобщённых характеристических свойств. Такое изменение в составах неслучайно, ибо оно обусловлено необходимостью реализации, прежде всего функционального аспекта системного исследования проблемы. Ведь главная задача первого этапа проектирования: сформулировать и описать его цель. Однако, рекомендумое изучение (анализ) для этого конструкторского чертежа позволяет охарактеризовать только её конечное отражение, описываемое Т-системой «деталь» (ТСД). Это весьма важный вывод, предопределяющий необходимость трансформации этой цели в дальнейшем для конкретизации её с учётом дискретности ТП, его растянутости во времени и пространстве. Использование философских категорий отнюдь не желание «играть модными словами», а констатация его характерной особенности, предопределяющей необходимость моделирования «системы пошаговых целей (дерева целей) ТП». Для её описания и введено в состав новое понятие – «Т-система заготовка» (ТСЗ). Такое расширение описания результатов исследования позволяет более полно раскрыть существо объекта проектирования, сделать важные уточнения, как в понятийной, так и в процедурной сторонах БТЗ, особенно в таких разделах, как теории базирования и размерных цепей.

Упомянутая выше смена состава и содержания понятий «объектов- представителей техносферы» глубоко символична и обусловлена семантически. Скажем, сравним пару: «деталь» из состава «классики» и «ТСД», соответственно, из предлагаемого. Чтобы осознать характер различия в них, прибегнем опять к использованию ассоциаций, тем более, что примеры сейчас легко найти даже из повседневной жизни. Для этого сопоставим содержание понятий: «Сидоров» и «физическое лицо», «ОАО Волна» и «юридическое лицо». Даже простому обывателю понятно их различие и абстрагированное, «множественное» содержание вторых в приведённых соответствиях.

И вот здесь особо важно восприятие смысла «множественности», весьма значимого понятия в дискретной математике, а в философии затрагивающего категории «часть» и «целое», «частное» и «общее». Отсюда, введённое в лингвистический словарь БТЗ понятие «Т-система» (скажем, конкретно, ТСД) означает, что это «собирательный образ некоторого множества конкретных её представителей, способных выполнить предписанную ей создателями функцию». Собирательность образа предопределяет естественную изменчивость всех характеристических свойств, необходимость оговаривать рамки допустимой, ожидаемой, действительной меры их изменчивости (точность параметра размера, например). Но главное состоит в том, что название предполагает использование чётко выраженной методики исследования этого объекта и системных понятий при этом.

Введение любых инноваций в педагогике будет эффективным только при условии соответствующей мотивации этого процесса, как для того, кто обучается, так и, особенно, для тех, кто обучает. Уповать здесь на «святой дух» участников бесперспективно! И это не просто предположение, а проверенный жизнью и историей тезис.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клевцов, В. А. Итерационный метод формирования структур технологических систем при автоматизации подготовки производства. – Диссертация на соискание учёной степени канд. техн. наук. Л., 1983. – 210 с.
2. Клевцов, В. А., Серогодская, Н. Я. Технология приборостроения: учебно-методический комплекс. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2010. – 254 с.
3. Клевцов, В. А., Максаров, В. В., Методология научного творчества: учебно-методический комплекс. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2013. – 109 с.
4. Клевцов, В. А. Некоторые итоги реализации принципа системности при техническом проектировании // Проблемы машиноведения и машиностроения: Сборник трудов. Вып. 40 – СПб.: СЗТУ – 2010 – с. 139-148.
5. Клевцов, В. А., Максаров, В. В., Падун, Б. С. Из истории формирования методологии развития техносферы // Проблемы машиноведения и машиностроения: Сборник трудов. Вып. 41 – СПб.: СЗТУ – 2011 – с. 201-227.
6. Клевцов, В. А. Некоторые итоги реализации принципа системности при техническом проектировании // Проблемы машиноведения и машиностроения: Сборник трудов. Вып. 41 – СПб.: СЗТУ – 2011 – с. 246-266.
7. Технология машиностроения: учеб. пособие для ВУЗов. В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения / Э. Л. Жуков [и др.]; под ред. С. Л. Мурашкина. – Изд. 3-е, стер. – М.: Высш. шк., 2008. – 277 с.

УДК 378.147

М.В. Лагунова, Н.В. Ежова, Д.В. Кетов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕПОДАВАНИИ КУРСА МАТЕМАТИКИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ МЕХАНИКО-МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ИММиТ



Лагунова Марина Витальевна, к.ф-м.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: +7 9219204378, E-mail: lagmarina@gmail.com



Ежова Наталья Владимировна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: +7 9117096699, E-mail: ezhovanv@gmail.com



Кетов Дмитрий Владимирович, доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: +7 9119147886, E-mail: distance-learning@spbstu.ru

Аннотация

В докладе изложена информация о новых технологиях математического образования на отделении бакалавриата механико-машиностроительного направления ИММиТ и о проведении эксперимента по использованию интернет-ресурсов в учебном процессе, которые предоставляют широкие возможности для самостоятельной работы студентов, а также возможность самостоятельно контролировать успешность усвоения курса математики.

Ключевые слова: интернет-технологии в образовании, интернет-ресурсы, видеолекция, дистанционное обучение, тест.

M.V. Lagunova, N.V. Ezhova, D.V. Ketov

THE USE OF INTERNET TECHNOLOGY IN TEACHING MATHEMATICS FOR STUDENTS OF MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF IME&T

Dr. Marina V. Lagunova[1], e-mail: lagmarina@gmail.com;
Natalja V. Ezhova[1], e-mail: ezhovanv@gmail.com;
Dmitrij V. Ketov[1], e-mail: distance-learning@spbstu.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

The article highlights information about new educational technologies in course in mathematics for IME&T bachelors in mechanical engineering field and about the educational experiments using IT. This approach gives wide opportunities of self-education and self-assessment for students.

Key words: IT in education, E-tutoring, video lectures, distance learning, distance education, test.

В настоящее время интернет стал неотъемлемой частью жизни современного человека. Особенно это касается учащейся молодежи. Именно в интернете они черпают почти всю необходимую информацию. Это быстро, удобно и просто. Поэтому возникает вопрос – почему бы не использовать интернет также и в процессе обучения? Кроме того, при переходе на двухступенчатую систему высшего образования число часов, отведенных на изучение, например, математики, существенно сократилось, в то время как программа осталась почти без изменений. Видимо, нам следует больше внимания уделять самостоятельной работе студентов. И именно интернет может в этом помочь.

В нашем университете, на кафедре «Компьютерные интеллектуальные технологии» (ИИТУ) был создан специальный сайт на основе платформы Moodle – «**Портал дистанционных образовательных технологий СПбГПУ»** http://dl.spbstu.ru/. Этот сайт содержит интернет-ресурсы по различным курсам. В том числе и такой консервативной дисциплины, как математика. На отделении механики ИММиТ с начала этого учебного года проводится эксперимент по применению ресурсов этого портала в учебном процессе. Вот о принципах работы с этим сайтом и пойдет речь в настоящем докладе, а также о некоторых результатах проводимого эксперимента.

Во-первых, из чего состоит курс математики, размещенный на Портале дистанционных образовательных технологий СПбГПУ. Это, прежде всего, двухуровневый электронный учебник, в котором содержится материал всего курса. Первый уровень – это систематическое изложение основных теоретических фактов, а также разобранных примеров по всем темам курса. Это так называемый опорный конспект лекций. На втором уровне электронного учебника студенты могут ознакомиться с предметом более глубоко, в том числе и с доказательствами более сложных теорем, а также освоить дополнительные главы курса математики. То есть у студентов есть выбор – все зависит от степени подготовки и желания самого студента.

Надо заметить, что чтение лекций «с листа», да и личное присутствие на лекции не всегда обеспечивает полное понимание и усвоение курса. По статистике, как утверждают психологи, не более 7

человек из 100 в состоянии усвоить материал сразу на лекции. Хотя, конечно, система математического образования (лекции и практические занятия) довольно хорошо себя зарекомендовала в течение даже не десятилетий, а столетий. Но, видимо, надо также понимать, что современные молодые люди в подавляющем большинстве отличаются от своих сверстников прошлых лет. В чем-то они уступают, а в чем-то превосходят их. Например, они с легкостью осваивают все новые и новые девайсы, которые в изобилии становятся доступными в наше время. Видимо, происходят также изменения и в их сознании. Опять-таки, как замечают психологи, сознание нового поколения стало более клиповым, то есть им сложно долго удерживать свое внимание на чем-то одном, они легче воспринимают информацию, оформленную именно в форме клипа. Хорошо это или плохо – не так уж и важно. Главное, что бороться с этим, по-видимому, бессмысленно. Может быть, разумнее этим воспользоваться? Кроме того, как известно, существуют психологические особенности личности. Есть визуалы и аудиалы, то есть люди, которые лучше воспринимают информацию зрительно, в том числе чтение книг и, соответственно, учебников. А есть те, которые лучше воспринимают информацию на слух. Для таких людей в современном обществе создаются специальные аудиокниги. Довольно сложно представить себе аудиоучебник по математике, но и тут на помощь могут прийти видеолекции, которые являются доступными для любого человека, будь он визуалом или аудиалом. Поэтому, кроме достаточно традиционного учебника, ресурсы Портала дистанционных образовательных технологий СПбГПУ содержат видеолекции, которые являются несомненным новшеством в технологии обучения последних лет.

Видеолекции призваны помочь тем студентам, которым, не смотря на все их старания, сложно освоить курс, а таких студентов довольно много. По причинам, о которых мы говорили выше, учебник не всегда может помочь даже очень старательному студенту. А лекция в аудитории читается только один раз. Что из себя представляют видеолекции, размешенные на сайте? На экране компьютера студенты видят презентацию в формате PowerPoint, в которой последовательно, как на привычной доске, появляются основные понятия, формулы, теоремы, рисунки и т.п. Голос за кадром комментирует происходящее на большом экране. Кроме того, студент может видеть еще один маленький экран с лектором, читающим эту лекцию. (При желании экран с преподавателем можно сделать еще мельче или вообще отключить, если он мешает.) Как это выглядит, можно увидеть на рис. 1. Это только один кадр, разумеется, но какое-то представление он может дать. Если правильно продумать анимацию, то мы как раз и получим изложение материала в стиле модного теперь клипа.

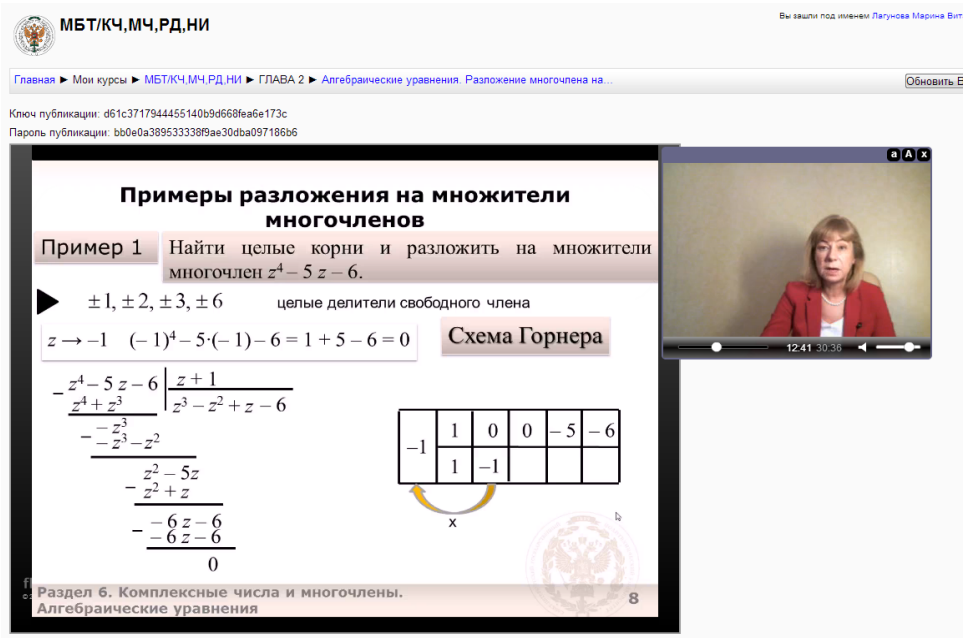


Рис. 1.

Основные преимущества видеолекции таковы:

- Каждая лекция занимает в среднем 20 минут, а не полтора часа, так что выкроить на нее время чрезвычайно занятому студенту не так сложно.
- Лекции можно смотреть в любое удобное время и столько раз, сколько необходимо.
- Удобно просматривать видеолекцию до того, как будет прочитана аналогичная лекция по расписанию занятий. Тогда есть шанс, что число студентов, усвоивших материал на самой лекции, существенно вырастет.
- Вместе с каждой видеолекцией на сайте размещены также слайды, по которым она была прочитана. При подготовке к экзамену, зачету или к контрольной работе студенты могут в нужном темпе просмотреть эти слайды, чтобы восстановить в памяти пройденный материал.

Но есть, конечно, и некоторые недостатки. Студенты говорят, что им все нравится, только они ощущают недостаток личного общения с преподавателем. Другой минус в том, что, возможно, снизится посещаемость. Хотя, в нашем опыте мы этого не наблюдали. Заметим, что эти недостатки очень противоречивы, и все, в конечном счете, зависит от конкретной личности студента и преподавателя.

Наконец, важнейшей частью ресурсов портала являются тесты разного плана. Это, прежде всего, индивидуальные домашние задания, которые студенты выполняют, и получают за них беспристрастные оценки компьютера в виде процентов правильно выполненных заданий. А также контрольные тесты, по которым преподаватель может сделать свое

заключение – либо студент получает зачет по пройденной теме, либо, если есть уверенность в том, что студент выполнил задание несамостоятельно или не выполнил его вообще, то такие студенты пишут контрольную работу по старой традиции в аудитории под контролем преподавателя.

Чтобы записаться на курс в начале первого семестра, студент должен пройти входное тестирование. Аналогичное тестирование они проходят также обычным образом в аудитории на первом практическом занятии. По результатам этих двух тестов мы, преподаватели, уже можем составить себе некоторое представление не только о степени их подготовки, но также о степени личного участия при прохождении компьютерного теста, и поделить студентов (условно, конечно) на хорошо подготовленных, не очень хорошо и откровенно хитрых.

Разумеется, результаты тестов, которые студент выполнил на компьютере, не являются поводом для получения положительной оценки за весь курс. Это лишь допуск к экзамену или зачет по дисциплине. Чтобы получить оценку в зачетку, студенты-механики пишут письменный экзамен (рис. 2). Этой практике уже лет 10. Состоит экзамен из 3-х коллоквиумов, где студенты должны продемонстрировать не только умение решать основные типовые задачи, но и знание теории, в том числе на хорошую и отличную оценку им необходимо уметь доказывать теоремы, которые были в читаемом им курсе лекций. Получается, что студенты изучают математику непрерывно, а не в режиме аврала пытаются выучить ее за 4 – 5 дней перед самим экзаменом. Первый коллоквиум, например, в весеннем семестре они пишут в самом начале апреля. Второй – в мае, а третий – уже на экзамене.



Рис.2.

И в заключение отметим, что студенты положительно отнеслись к вводимой системе, а предоставленные Порталом ресурсы для

самостоятельной работы над учебным материалом, а также возможность самоконтроля должны повысить успешность усвоения материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.П. Козликин, М.М. Радкевич. Особенности подготовки бакалавров по новому федеральному государственному образовательному стандарту // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 47-50.
2. В.В. Носов. Внедрение информационных технологий в процесс изучения технических дисциплин // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 108-117.
3. Е.С. Полат, М.Ю. Бухаркина, М.В. Моисеева. Новые педагогические технологии в системе образования // М.: Издательский центр «Академия», 2002. – С. 272.
4. М.В. Лагунова, Н.И. Лобкова, В.М. Семенов. Линейная алгебра и аналитическая геометрия. Опорный конспект. // М.: Изд-во «Проспект», 2013. – С. 138.
5. Н.И. Лобкова, Ю.Д. Максимов, Ю.А. Хватов. Математика. Вып. 10, часть 1. Дополнение к опорному конспекту. // СПб: Изд. СПбГТУ, 2004.
6. Ю.А. Хватов. Тесты по математике в учебном процессе. // «Математика. Методические рекомендации для преподавателей и студентов», СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. – С. 77 – 100.
7. Gnudi, A., Fornasa, W., Lorenzi, A., Malvisi, L. Integration of e-Tutoring in a Blended Learning Course on Mathematics, Proceedings of LINC 2007 Conference,Technology-Enabled Education: A Catalyst for Positive Change-Amman, Jordan, 2007.
8. Cavalli E., Gnudi A., Lorenzi A., Malvisi L., The Virtual Classroom within Blended Learning, Proceedings of EDEN 2006 // Annual Conference, Vienna, 2006.
9. M.I. Santally, A. Senteni. Effectiveness of Personalised Learning Paths on Students Learning Experiences in an e-Learning Environment. // http://www.eurodl.org/ 21.03.2013
10. T. Anderson, J. Dron. Learning technology through three generations of technology enhanced distance education pedagogy. // http://www.eurodl.org 13.09.2012

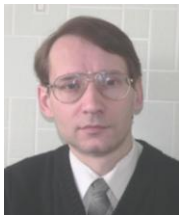
УДК 51

Н. И. Лобкова, А.Л. Буляница, М.В. Лагунова

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ КУРСА МАТЕМАТИКИ ДЛЯ БАКАЛАВРОВ



Наталья Ивановна Лобкова, к.ф.-м.н, профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)349 50-85, E-mail: lobkova@list.ru



Антон Леонидович Буляница, д.ф.-м.н, профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552 12-93, E-mail: antbulyan@yandex.ru



Марина Витальевна Лагунова, к.ф.-м.н, доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)345 48-92, E-mail: lagmarina@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы реализации курса математики для бакалавров, отмечены негативные последствия сжатия курса по сравнению с программой 2009 г., а также принимаемые кафедрой высшей математики меры для их минимизации. Отмечен факт исчезновения фундаментальной подготовки студентов по математике и предложено увеличить объём курса.

Ключевые слова: математика, Федеральный образовательный стандарт третьего поколения.

N.I. Lobkova, A.L. Bulaynitsa, M.V. Lagunova

EXPERIENCE IN THE IMPLEMENTATION OF THE MATHEMATICS COURSES FOR BACHELORS

Prof. N.I. Lobkova[1], e-mail: lobkova@list.ru;
prof. A.L. Bulaynitsa[1], e-mail: antbulyan@yandex.ru;
prof M.V. Lagunova[1], e-mail: lagmarina@gmail.com.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

In the article the questions of realization of the mathematics courses for bachelors noted the negative consequences of compression rate compared with the program of 2009, and adopted by the Department of higher mathematics measures to minimize them. The fact that the disappearance of fundamental training of students in math and the proposed increase in the content of the course.

Key words: mathematics, the Federal educational standard of the third generation.

В Институте металлургии, машиностроения и транспорта, а ранее на механико-машиностроительном факультете курс математики для бакалавров преподаётся второй год. Работа ведётся в рамках федерального образовательного стандарта третьего поколения. Как показала практика, следование стандарту представляет известные трудности. Он разнороден для различных специальностей. В одном случае он требует усвоения основных понятий и методов математики (направление 150700 Машиностроение), тем самым предоставляя выбор разделов и способа изложения в рамках академических часов, планируемых соответствующим учебным планом. В другом перечисляются разделы курса математики (направление 151900 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств), совокупность которых невозможно изложить за планируемое время, если не перечислять одни заголовки. Следует иметь в виду, что чтение курса математики обладает внутренней логикой, например, некоторые разделы невозможно изложить, предварительно не рассмотрев другие. Кроме того, мы должны обслуживать другие фундаментальные дисциплины, а также специальные дисциплины.

В основном учебными планами кафедр на курс математики выделяется 270 академических часов в течение 3-х семестров (на 16,7% меньше, чем в программах 2009 г.) и только для направления 161600 Прикладная механика выделено 324 часа за 4 семестра.

Разработанные ранее опорные конспекты и сборники индивидуальных заданий [1-4], в силу того, что они в значительной степени были ориентированы именно на студентов механико-машиностроительного факультета, по-прежнему являются базовыми учебными пособиями. Однако, доля использованного в процессе курса материала, представленного в них, уменьшается по сравнению с предыдущим периодом времени. Помимо этого, в список рекомендованной учебной литературы включен учебник для вузов «Высшая математика» [5], но доля студентов, пользующихся им, также убывает.

Практика показала, что курс студентами усваивается с трудом. Всё время ощущение, что мы куда-то спешим и никуда не успеваем.

В первую очередь излагаются разделы, без изучения которых невозможно дальнейшее обучение, как, например, без знания векторной алгебры нельзя изучать теоретическую механику и сопромат. Лекции, вообще говоря, можно прочитать и в быстром темпе, но на практических занятиях быстрый темп невозможен. Прежде всего, продолжается ухудшение математической подготовки абитуриентов. В качестве объяснения этой ситуации можно указать несколько причин: общее положение в стране, тяга к лёгким деньгам, поддерживаемая телевидением, непонимание школьниками того, что учиться можно только, прикладывая труд, и наконец, введение пресловутого ЕГЭ.

Следует отметить, что мы не можем опираться на школьный курс математики. Так, векторы проходятся в 8-м классе и после этого к ним уже не возвращаются и задачи на векторы не включены в ЕГЭ. Также и даже хуже обстоит дело с производными и интегралами. Интегралы в некоторых школах, как говорят студенты, вообще не проходят, или только сообщается, что это такое. А при создании ФОС-3, видимо, учитывалось, что эти темы изучались в школе. Ввиду насыщенности курса для бакалавров мы не можем уделять достаточно времени для решения задач. Формально в ФОС-3 в число часов курса включены часы, отводимые на самостоятельную работу студентов. В министерстве полагают, что студенты активно занимаются самостоятельной работой, но, во-первых, это далеко не так, во-вторых, специфика нашего курса такова, что его трудно усваивать самостоятельно при отсутствии природных данных, наличие которых трудно предполагать в наших студентах. Абитуриенты, обладающие ими, поступают на другие факультеты или в другие вузы. Кстати говоря, число часов для самостоятельной работой запланировано в учебных планах различным для разных направлений.

К настоящему времени курс математики для бакалавров был полностью реализован для студентов нынешнего второго курса, лекторы: проф. Буляница А.Л. и доц. Лагунова М.В. Как показала практика, переход от 4-х семестрового к 3-х семестровому построению курса привел к следующим, в основном, негативным последствиям:

1) необходимость включения в программу семестра большего числа разделов дисциплины. Как следствие, более слабая связь между разделом курса и соответствующим контрольным мероприятием (в частности, коллоквиум);

2) минимизация, вплоть до исключения из курса, таких важных разделов и вопросов, как поверхностные интегралы (связанные с курсом физики, т. к. понятия поток, циркуляция и т. п. используются в электро- и магнитодинамике), сильно сокращены тройные интегралы, теоретическая часть, связанная с дифференциальными уравнениями (основной упор сделан на линейные однородные и неоднородные уравнения, поскольку они в большей степени связаны с курсом сопромата и т. п.), при этом проблемы

устойчивости решений ДУ практически не рассматриваются и, наконец, сильно сокращены применения рядов Фурье. Таким образом, функциональные ряды практически ограничены степенными рядами (в основном, Тейлора и Маклорена);

3) итоговая оценка курса, идущая в диплом, формируется по итогам изучения раздела «Теория вероятностей и математическая статистика». Ранее, при прежней структуре курса, третий семестр, завершающийся дипломной оценкой, включал такие разделы, как дифференциальные уравнения, кратные и криволинейные интегралы и ряды. Учитывая специфику раздела «Теория вероятностей», предыдущий вариант формирования итоговой оценки по высшей математике представляется более репрезентативным и адекватным.

Процесс реализации курса на последнем третьем семестре обучения при всём старании с нашей стороны привёл к тому, что на третий семестр с двумя часами лекций и одним часом практики в неделю остались следующие разделы: кратные интегралы, ряды и вероятность с матстатистикой, в то время, как в предыдущей программе такой семестр (он был четвёртым в курсе) отводился целиком на вероятность с матстатистикой.

Выход из такой тяжёлой ситуации был найден в том, что на одном из потоков ряды с интегралами изучались на практических упражнениях, а на лекции – вероятность, т. е. теория вероятностей осталась без практики. Ряды и интегралы пошли на зачёт в виде сдачи расчётных заданий, а теория вероятности – на экзамен. По теории вероятностей писали 2 коллоквиума, с третьей попытки довольно успешно. Матстатистику не успели сделать, хотя одна лекции на неё была выкроена и во второй коллоквиум включены основные моменты, типа гистограммы, эмпирической функции распределения, моды, медианы, выборочного среднего, выборочной дисперсии и исправленной выборочной дисперсии. Лабораторной работы на обработку выборочных данных методами матстатистики не давали за неимением времени. Заметим, что в тестах на остаточные знания очень любят спрашивать про исправленную дисперсию.

Успеваемость по математике, обучающихся по программе бакалавров, ухудшилась по сравнению с прошлыми годами, когда работали по старым программам и курс не был так сжат. Причём имеем место и количественное и качественное ухудшение.

В борьбе с трудностями кафедра высшей математики предпринимает различные шаги. Так, помимо вышеупомянутого специального подхода к изучению разделов курса в третьем семестре, введён компьютерный контроль через портал Интернета за выполнением домашних заданий, а также наличие лекций по курсу математики на этом портале. Этому направлению нашей работы посвящён отдельный доклад (Лагунова М.В. и др. «Использование интернет-технологий в преподавании курса математики для студентов механико-машиностроительного направления ИММиТ).

Отвечая на вопрос, что исчезло в процессе преподавания математики для бакалавров по сравнению с работой по старым программам, отметим, что в первую очередь потеряна фундаментальность математики как дисциплины. Эта потеря невосполнима на уровне магистра, так как там не будут доказываться теоремы, не доказанные из-за нехватки времени на уровне бакалавра. А именно доказательства теорем развивают у студентов логическое и алгоритмическое мышление. Кроме того, недостаточно уделяется времени для решения задач на практических занятиях. А без этих навыков невозможно выполнить требование федерального стандарта о применении математических методов в технических приложениях. Чтобы разработать эти навыки необходимо вернуться к числу часов на курс математики, такому, как было в программе 2009 г. Это число в настоящее время есть на кафедре Машиноведение и детали машин. Их группе (2047/1) в четвёртом семестре курса читается курс математической статистики, цель которого формулируется более широко, нежели «математическая статистика» и состоит в изучении основных методов обработки экспериментальных данных (см. доклад проф. Буляницы А.Л. «Принципы формирования программы курса по выбору для студентов технических факультетов на примере дисциплины «математическая статистика»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагунова М.В., Лобкова Н.И. Индивидуальные задания по математике. – Ч.1. Линейная алгебра. Кривые и поверхности второго порядка. Анализ бесконечно малых. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 52 с.
2. Лагунова М.В., Лобкова Н.И., Павлюков К.В. Индивидуальные задания по математике. – Ч.2. Исследование функций и построение графиков. Комплексные числа и многочлены. Дифференциальное исчисление функций нескольких переменных: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 43 с.
3. Лобкова Н.И., Лагунова М.В., Семенов В.М. Математика. – Вып. 1. Основы линейной алгебры и аналитической геометрии: Опорный конспект. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 108 с.
4. Лобкова Н.И. Математика. – Вып. 2. Введение в математический анализ. Дифференциальное исчисление функции одной переменной: Опорный конспект. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2003. – 132 с.
5. Шипачев В.С. Высшая математика. Учеб. для вузов. – М: Высшая школа, 2002. – 479 с.

УДК 378

О. В. Мкртычев

О КРЕДИТНО-БАЛЛЬНОМ РЕЙТИНГЕ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ



Олег Витальевич Мкртычев, ст. преподаватель
Филиал ГОУ ВПО БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске
ул. Рубина, 5, Новороссийск, 353900, Россия.
Тел.: (8617)221-333, E-mail: oleg214@ya.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы применения зарубежного опыта контроля знаний в системе российского образования. Процесс обучения показывает, что применение принципов балльно-рейтингового оценивания студентов может уменьшить субъективизм, но потребует увеличения работы преподавателей по рабочей программе.

Ключевые слова: преподавание, рейтинг студентов, кредитно-балльный рейтинг

O.V.Mkrtychev

ABOUT THE CREDIT-MARK RATING OF KNOWLEDGE OF STUDENTS

Oleg V. Mkrtychev, V.G.Shukhov's BSTU in Novorossiysk, Russia, e-mail: oleg214@ya.ru

Abstract

In article questions of application of foreign experience of the control of knowledge in system of the Russian education are considered. Process of training shows, that application of principles credit-rating grade of students can reduce subjectivity, but will demand increase in work of teachers under the working program.

Keywords: teaching, a rating of students, a credit-mark rating

Реформирование системы высшего образования в организационном и методическом плане выдвигает требования к изменению методики и организации профессиональной подготовки студентов в соответствии с принципами Болонской декларации и с использованием зарубежного опыта. Так как для выполнения конкретной профессиональной деятельности будущему выпускнику вуза потребуются знания, умения и навыки таковой, а также базовые ценности и мотивированное применение

этих способностей, то предлагаемый классификатор компетенций выпускника вуза охватывает широкий диапазон прав и функций специалиста: ключевые надпрофессиональные, общепрофессиональные, профессиональные [1, 2]. Чтобы дать студенту возможность овладеть этими знаниями и умениями профессорско-преподавательскому составу вузов придётся перераспределить задачи в областях своих компетенций: предметно-цикловых, предметных и межпредметных. В академической и вузовской среде постоянно обсуждаются как теоретические, так и прикладные проблемы компетентностного подхода в нашей системе образования [2]. В частности, ставится вопрос о переходе на новую систему оценок знаний студентов – кредитно-балльном рейтинге. Хотя в данный момент в нашем вузе расчёт балльно-рейтинговых показателей деятельности студента не предусмотрен, но ректоратом уже ставится проблема разработки подобной методики оценки знаний студентов и включения её в учебный план каждого преподавателя. В качестве инструмента сравнения рассмотрим европейскую кредитную систему перезачёта зачётных единиц – ECTS, обеспечивающая соизмеримость и сопоставимость результатов обучения при наличии разных типов квалификаций и программ обучения. Кредиты/баллы в данной системе – количественный показатель вклада дисциплины в общую учебную нагрузку студента за всё время обучения в университете.

Понятно, что интеграция российского высшего образования в общеевропейскую систему подготовки кадров высшей квалификации требует принятия в вузах системы оценок, позволяющей в совокупности с другими критериями сравнивать уровень подготовки выпускников вузов разных стран. Судя по всему, баллами предполагают привязать уровень подготовки и обеспечить достоверную информацию относительно сложности и глубины курса. В приложении-вкладыше к диплому они должны дополняться информацией о вузе, полученной степени, уровне, содержании, качестве работы выпускника (в виде оценок) и др. Но чтобы придать системе баллов реальный статус общеевропейской единой системы оценки уровня образования, балльно-рейтинговую систему необходимо связать с механизмами обеспечения качества и критериями оценки результатов обучения. Рассмотрим предметно применение этой системы. Подобный предметный анализ реальной деятельности вуза поможет уточнить некоторые дискуссионные методологические и общетеоретические вопросы.

Сложившаяся в нашей стране методика оценивания знаний содержит четыре уровня – это оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно». Европейская система оценок по ECTS содержит семь уровней – это оценки A, B, C, D, E, FX, F. Можно примерно сопоставить наши оценки с европейскими следующим образом: A – отлично, B – очень хорошо, C – хорошо, D – удовлетворительно, E –

посредственно, FX – условно неудовлетворительно, F – безусловно неудовлетворительно. Коэффициент освоения знаний, умений и компетенций для четырёх балльной системы имел в общем примерно такую сетку: «неудовлетворительно» – менее 0,6; «удовлетворительно» – от 0,6 до 0,73; «хорошо» – свыше 0,73 до 0,87 и «отлично» -- от 0,87 до 1. Подобная система коэффициентов для новой системы имеет примерно такой вид: f – менее 0,35; fx – до 0,5;e – до 0,65; d - до 0,7; c - до 0,85; b –до 0,95; a -до 1; что позволяет сравнивать эти две системы (таблица1).

Таблица 1.

«неудовлетворительно»		«удовлетворительно»		«хорошо»	«отлично»	
F	**FX**	**E**	**D**	**C**	**B**	**A**
2	**2+**	**3**	**3+**	**4**	**5**	**5+**

Вот методические рекомендации для критериев проставления оценок:

A. Оценка «отлично» ставится, если теоретическое содержание курса освоено полностью**,** без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

B. Оценка «очень хорошо» ставится, если теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения большинства из них оценено числом баллов, близким к максимальному.

C. Оценка «хорошо» ставится, если теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

D. Оценка «удовлетворительно» ставится, если теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые из выполненных заданий содержат ошибки.

E. Оценка «посредственно» ставится, если теоретическое содержание курса освоено частично, некоторые практические навыки работы не сформированы, многие предусмотренные программой обучения учебные

задания не выполнены, либо качество выполнения некоторых из них оценено числом баллов, близким к минимальному.

FX. Оценка «условно неудовлетворительно» ставится, если теоретическое содержание курса освоено частично, необходимые практические навыки работы не сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнено, либо качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному; при дополнительной самостоятельной работе над материалом курса возможно повышение качества выполнения учебных заданий.

F. Оценка «безусловно неудовлетворительно» ставится, если теоретическое содержание курса не освоено, необходимые практические навыки работы не сформированы, все выполненные учебные задания содержат грубые ошибки, дополнительная самостоятельная работа над материалом курса не приведёт к какому-либо значимому повышению качества выполнения учебных заданий.

Таблица 2.

К	Б	**F**	**FX**	**E**	**D**	**C**	**B**	**A**
1	36	Менее 14	14-19	21-23	24-26	26-30	31-33	34-36
2	72	Менее 26	26-38	41-46	47-52	51-61	61-66	67-72
3	108	Менее 38	38-55	61-69	70-78	76-92	91-99	100-108
4	144	Менее 50	50-73	81-92	93-104	101-123	121-132	133-144
5	180	Менее 62	62-91	101-115	116-130	126-154	151-165	166-180
6	216	Менее 74	74-109	121-138	139-156	151-185	181-198	199-216
7	252	Менее 85	86-127	141-161	162-182	176-216	211-231	232-252
8	288	Менее 98	98-145	161-184	185-208	201-247	241-264	265-288
9	324	Менее 111	109-162	163-189	190-216	237-270	271-297	298-324

Чтобы избежать субъективизма при оценивании проделанной работы можно оценить каждый вид деятельности студента в баллах. Пусть $К_{год}$ – количество кредитов, которые студент получит по всем предметам за учебный год. Тогда на один предмет будет выделена часть годового кредита $К_{предмет}$, с которой и предстоит работать преподавателю при составлении учебного плана (для простоты далее обозначим это число К). При этом предлагается, как один из вариантов, приравнять одну кредитную единицу 36 часам трудоёмкости отводимой на изучение дисциплины государственным образовательным стандартом, что

соответствует 36 баллам рейтинговой системы оценки знаний, т.е. 1к = 36б (в этом случае количество баллов мало чем отличается от общей трудоёмкости, отводимой на изучение предмета). Так как рабочей программой любой дисциплины по каждой специальности определено время на выполнение всех видов аудиторных и внеаудиторных занятий и самостоятельной работы студента, то можно легко оценить работу студента после прохождения контрольного мероприятия. При этом студент набирает какое-то количество баллов по определённому модулю дисциплины и получает определённое количество баллов, соответствующее приобретённым знаниям, умениям, компетенциям. Таким образом, за освоение данного предмета студент может получить следующее число баллов – 36К, которое обозначим Б. Например, кафедра сопротивления материалов уфимского ГТУ предлагает для различных специальностей и программ обучения (т.е. для различного количества К) следующую систему кредитно-балльного рейтинга (таблица 2). По таблице 2 видно, что коэффициенты освоения материала по каждой оценке в среднем близки со значениями a, b, c, d, e, fx, f, данными выше. При этом в уфимском ГТУ количество кредитов в годовой программе – не более 60. При подготовке к степени бакалавра за весь период обучения (4 года) – не более 240, магистра – не более 120. По разным дисциплинам в зависимости от специальности количество кредитов может изменяться (напр. от 2 до 7). При этом количество баллов, которые может набрать студент, тоже изменяется (напр. от 72 до 288).

В качестве инструмента оценивания предлагается взять метод «трёх вопросов» для оценки усвоения теоретического материала и «трёх задач» для оценки практических навыков, приобретённых студентом. Т.е студенту задаются вопросы/задачи в порядке убывания сложности. Если студент отвечает на первый (самый сложный), то в зависимости от развёрнутости, полноты ответа и меры владения материалом преподаватель ставит оценку разряда A или B (проставляет количество баллов из этого диапазона). Если он не отвечает на первый вопрос, но отвечает на второй – оценка C. Если от отвечает только на третий вопрос, то ставится оценка E или D. Если же не отвечает ни на один из вопросов, то оценивается FX или F.

Личное ощущение автора от проводимой реформы образования можно выразить двумя крылатыми фразами двух прошедших столетий. Первая из них – «как друзья вы не садитесь…» и вторая – «может в консерватории что-нибудь подправить?..». Проблема не в том, как оценивать знания полученные студентами в процессе обучения в вузе. Проблема в том, что уже на стадии среднего образования сделано всё (и в материальном, и в моральном плане), чтобы не только этих знаний у детей не появилось, но и не появилось бы никогда впредь желание получать знания в принципе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мкртычев О.В. Компьютерное моделирование при кинематическом анализе плоских механизмов. // Теория механизмов и машин. 2012. Т. 10. №1. С. 46-52.
2. Мкртычев О.В. Проблемы обучения студентов компьютерному моделированию при изучении дисциплин «теоретическая механика» и «теория механизмов и машин». // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2012, №1.
3. Мкртычев О. В. Компьютерные технологии в преподавании ТММ – цель или средство? // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012 / Под ред. Радкевича М.М., Евграфова А.Н. – С.96-102.

УДК 378.147

Н. И. Наумкин, Е. А. Нуянзин

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СХЕМА ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ К ИННОВАЦИОННОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ФГОС



Николай Иванович Наумкин, д.п.н., профессор
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
Россия, Саранск, Республика Мордовия
Тел.: (8342) 25-4456, E-mail: naumn@yandex.ru



Евгений Анатольевич Нуянзин, к.т.н., доцент
Мордовский государственнй университет им. Н.П. Огарёва
Россия, Саранск, Республика Мордовия
Тел.: (8342) 25-4456, E-mail: nuyanzin@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы обучения студентов инженерных направлений подготовки на основе ФГОС-III в условиях национально-исследовательских университетов. Результаты исследования показали, что одним из способов качественного формирования компетенций у студентов является использование интегрированной системы подготовки, включающей в себя требования стандарта и их реализацию в элементах педагогической модели, разработанной в условиях национально-исследовательского университета.

Ключевые слова: мотивация, инновационная деятельность, инновационные продукты, компетенции, интерактивная форма, цели учения, цели обучения.

N.I. Naumkin, E.A. Nuyanzin

INTEGRATED CIRCUITS, PREPARING STUDENTS FOR INNOVATIVE ENGINEERING ACTIVITIES BASED ON FSES

Dr. Nikolay I. Naumkin[1], e-mail: nuyanzin@yandex.ru;
Dr. Evgeny A. Nuyanzin[1], e-mail: nuyanzin@yandex.ru.
[1]Ogarev Mordovia State University

Abstract

The article is devoted to preparation of engineering students in the areas of training on FSES-III in terms of national research universities. The results

showed that one of the ways to build skills quality of students is the implementation of an integrated circuit training, which includes the requirements of the standard and its implementation in the elements of the pedagogical model developed in a national research university.

Key words: motivation, innovation, innovative products, expertise, interactive form, purpose doctrine, training objectives.

В связи с переходом Российского образования на двухуровневую систему, введение Федеральных государственных образовательных стандартов третьего поколения (ФГОС-III) возникла необходимость перестройки традиционных методов преподавания дисциплин на современные. Все это предусмотрено также требованиями нового стандарта подготовки бакалавров.

В соответствие с содержанием ФГОС-III по направлению подготовки 110800 «Агроинженерия» срок освоения образовательной программы высшего образования сокращен на 1 год и составляет согласно характеристике направления 4 года или 240 зачетных единиц (ЗЕ). Анализируя характеристику профессиональной деятельности бакалавра можно убедиться, что она не значительно, а в некоторых моментах практически не отличается, от традиционной характеристики подготовки 5-летнего специалиста-инженера по специальностям «Механизация сельского хозяйства», «Механизация переработки сельскохозяйственной продукции» и «Технология обслуживания и ремонта машин в АПК». Вот, например что записано в стандарте II поколения подготовки дипломированного специалиста в характеристике профессиональной деятельности: «…Объектами профессиональной деятельности выпускника являются: машинные технологии и системы машин для производства, хранения и транспортирования продукции растениеводства и животноводства; технологии и средства технического обслуживания, диагностирования и ремонта машин; машины, приборы и оборудование машиноиспытательных станций и предприятий технического сервиса…» [1]. В ФГОС-III это звучит следующим образом: «…Объектами профессиональной деятельности бакалавров являются: машинные технологии и системы машин для производства, хранения и транспортирования продукции растениеводства и животноводства; технологии и средства мелкосерийного производства сельскохозяйственной техники; технологии технического обслуживания, диагностирования и ремонта машин и оборудования; методы и средства испытания машин; машины, установки, аппараты, приборы и оборудование для хранения и

Осуществлено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания, проект 53/18 – 12 «Формирование у студентов национальных исследовательских университетов компетентности в инновационной инженерной деятельности на основе погружения в инженерное творчество».

первичной переработки продукции растениеводства и животноводства, а также технологии и технические средства перерабатывающих цехов и предприятий…» [2]. То есть, присутствует идентичность объектов профессиональной деятельности.

Возникает противоречие между необходимостью подготовки практически традиционного специалиста, обладающего всеми необходимыми общекультурными и профессиональными компетенциями, заложенные в требованиях к результатам освоения основных образовательных программ во ФГОС-III и сокращенными сроками обучения.

Одним из способов разрешения этого противоречия является внедрение новых (инновационных и интерактивных) методов обучения, подготовки студентов к будущей инновационной инженерной деятельности (ИИД). На рис. 1 представлена предлагаемая схема такой подготовки студентов к ИИД на основе ФГОС-III.

Как видно из рис. 1, для реализации поставленной задачи необходима тесная взаимосвязь между содержанием ФГОС-III и методами его реализации в условиях ВУЗа.

Частично задача упрощается, если выполняются требования к структуре основной образовательной программе, заложенные ФГОС. Так например, при освоении ООП по направлению 110800 «Агроинженерия» предусмотрены три цикла дисциплин: ГСЭ (гуманитарный, социальный и экономический цикл), математический и естественнонаучный цикл и профессиональный цикл. Отдельной дисциплиной предусмотрена физическая культура. Рассматривая каждый из циклов, можно заметить, что на вариативную часть отводится до половины ЗЕ. Так в ГСЭ она составляет 15-17 ЗЕ (при 18-22 ЗЕ базовых), в математическом и естественнонаучном цикле до 25 ЗЕ (при 25-35 ЗЕ базовых), в профессиональном эта величина достигает 70-75 ЗЕ (при 35-45 ЗЕ базовых). Таким образом, у высших учебных заведений, особенно которым присвоена категория «Национально-исследовательский» (таких как ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарёва»), имеется хорошая возможность самим разработать вариативную часть дисциплин с целью более полного освоения компетенций.

Занятия должны вестись высококвалифицированными кадрами (процент остепененных должен быть не менее 50, из них докторов наук не менее 8%). Кроме того, должны быть привлечены ведущие специалисты производства (не менее 5% от общего количества преподавателей).

Для реализации всех поставленных целей на рис.1 представлена педагогическая модель [10], которая позволит повысить качество подготовки выпускников инженерного профиля и максимально подготовить их к ИИД.

Требования ФГОС-III обязательно должны быть реализованы компонентами педагогической модели, представленной на рис. 1.

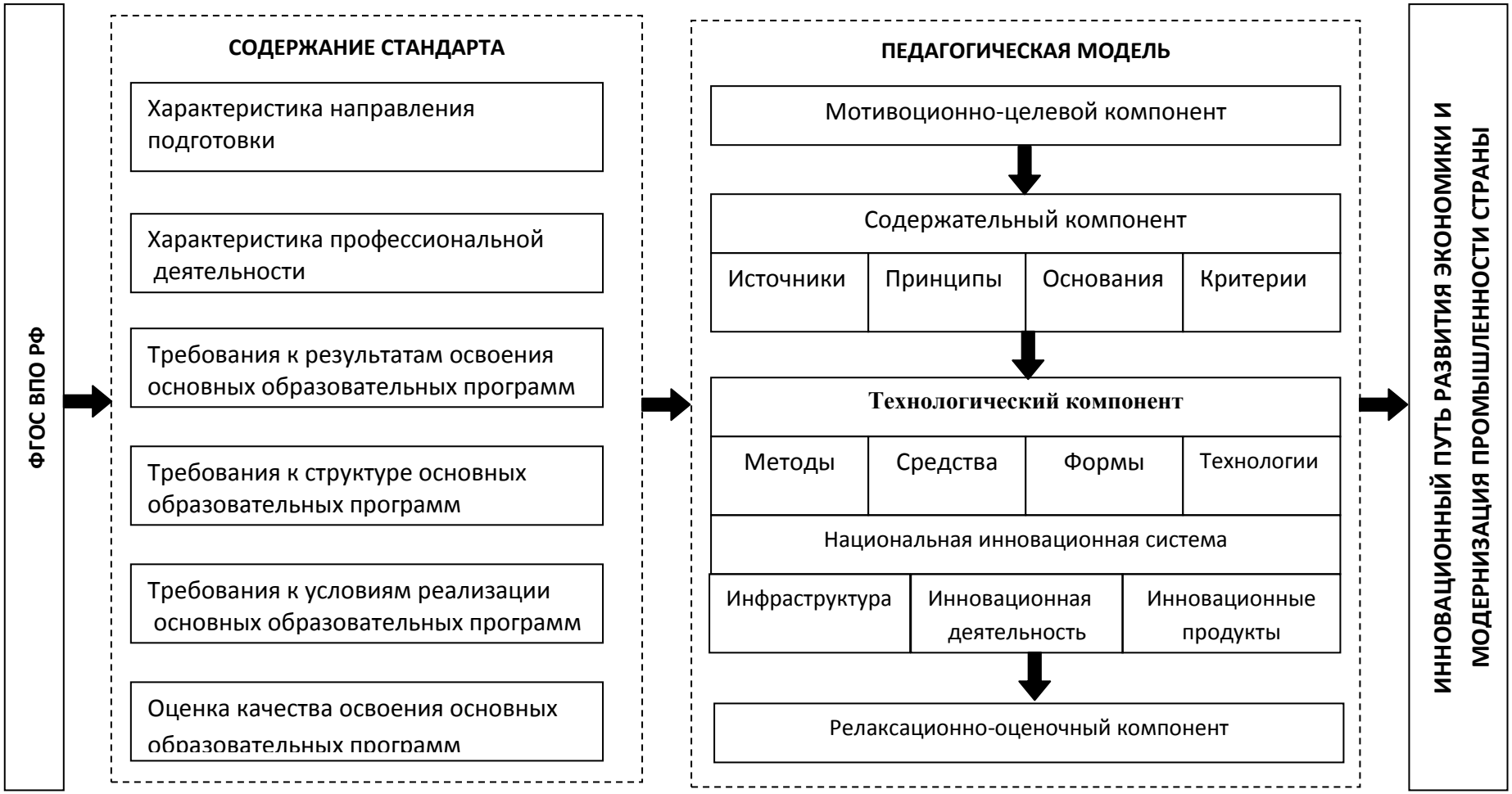


Рис. 1. Интегрированная схема подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности на основе ФГОС

В первую очередь это конечно, мотивационно - целевой компонент. Понятие мотивации – это сложный психологический феномен (потребности, мотивы, установки), под которым понимают то, что «объясняет целенаправленность действия» [6]. Мотивация представляет собой совокупность внутренних и внешних движущих сил, побуждающих человека к деятельности, и задающих ее границы и формы, а также придающих ей направленность, ориентированную на достижение определенных целей. С другой стороны, «цель обозначает предвосхищение в сознании некоторого результата, на достижения которого направлены действия субъекта, носителя этой цели» [3]. Поэтому мотивация рассматривается как процесс сопряжения целей субъекта обучения и целей объекта обучения.

Анализ психолого-педагогической литературы показывает, что вопросами связи оперативного целеполагания и мотивации уделено много внимания в работах А.К. Марковой, В.А. Сластенина и других ученых [4, 5, 6], которые считают, что по источнику и способу образования цели могут быть внутренними (инициативными), то есть формируемыми человеком самостоятельно, либо внешними, если они задаются извне. Внешние и внутренние цели различаются между собой способами связи целей с потребностями, мотивами и установками, побуждающими субъекта к их достижению. Связь между целями и мотивами, в первом случае, образуется по направлению от целей к мотивам – цель выбирает мотив, во втором – по направлению от потребностей и мотивов к целям, трансформирующихся в цели. Поэтому, данную модификацию в теории управления определяют как мотивационно-целевую. Становление мотивационно-целевого развития воспитанников – одна из главных задач педагогического управления системой обучения.

Формирование мотивационного компонента интеллектуального развития студентов заключается в подчеркивании важности побуждения их к построению и реализации целенаправленного обучения. В мотивационно-целевой основе обучения следует различать понятия «цели обучения» и «цели учения». Цели обучения задаются извне. В них выделяются общественные потребности и ценности, которые по отношению к воспитаннику являются внешними. Цели учения определяются выражаемыми в них индивидуальными потребностями, мотивами и установками, сформировавшимися в предшествующем опыте учащихся.

Цели обучения и учения могут совпадать лишь в идеальном случае, когда допускается абсолютное слияние индивидуальной мотивации студентов с системой общественных потребностей и ценностей.

Мотивационно-целевые установки служат исходным основанием для прогнозирования и планирования учебной деятельности учащихся, определяют организационные формы, способы, средства исполнения принятых решений, предназначены для контроля и оценки фактических результатов обучения, а также поведения и деятельность объектов учения.

Осознание мотивационно-целевых потребностей формируют внутренние мотивы на целенаправленную преобразующуюся учебную деятельность. Самосознание является исходным началом мотивации, которая усиливается по мере развития потребностей. Вслед за самосознанием начинают развиваться процессы самоопределения, самовыражения, самоутверждения, самореализации и саморегуляции. А это означает трансформацию позиции обучающегося из объекта обучения в субъекта самообучения.

Становление мотивационного аспекта мировозренческой цели оперативного уровня проявляется в развитии адекватного эмоционального отклика на выбранную цель к положительным нравственным целям – положительное отношение, к антиподам морали – отрицательное. Тонкость осмысления качественной адекватности отношения к цели требует сильно выраженной личной ответственности за развитие мотивационного аспекта нравственной цели, так как его соответствие или несоответствие целям добра и зла определяется только самим учащимся как субъектом поведения. Постановка и реализация мировоззренческих целей позволяет активизировать внутренние побудительные силы личности: потребности, мотивы, установки, которые при грамотной педагогической деятельности воспитывают у личности положительное отношение к познанию мира и своему духовно-нравственному саморазвитию, а также способствуют развитию познавательного интереса у учащегося как субъекта учения [7]. Таким образом, реализация этого компонента позволит мотивировать студентов к углубленному освоению компетенций для последующей их реализации в условиях инновационного производства.

Вторым компонентом педагогической модели является содержательный компонент, который включает в себя источники, принципы, основания и критерии. В качестве источника педагогической модели являются требования ФГОС и требования будущих работодателей, которые служат «техническим заданием» для подготовки студентов в ВУЗе. Особенно это отражено, как уже описывалось выше в требованиях к освоению ООП. То есть, например, педагогу, имеющему не профильное образование, очень трудно будет подготовить выпускника с требуемыми компетенциями, особенно в области профессионального цикла дисциплин. По этой же причине рекомендуется заменять таких педагогов опытными специалистами с производства. Что касается принципов педагогической модели, то для нас наиболее важными являются такие принципы, как: принцип научности, вариативности, практической ориентации, интеграции.

Анализируя каждый из принципов, замечаем, что практически каждый из них применим в условиях национально-исследовательских ВУЗов. Так без принципа научности (т. е. без передачи знаний о новых достижениях в науке, о разработках) вообще невозможна подготовка студентов в условиях университета. Принцип вариативности же позволяет формировать различные (вариативные) мышления у студентов. Принцип практиче-

ской ориентации наиболее ярко выражен у студентов технических направлений подготовки. Например, у студентов направления 110800 «Агроинженерия» на практику отводится до 28 ЗЕ, что составляет более 10% от всего объема обучения. При этом как нельзя лучше формируется представление о будущей профессии. Особенная эффективность реализации этого принципа могла бы реализовываться при прохождении практик в условиях технопарков, новых инновационных лабораторий, студенческих конструкторских бюро и т. д. Принцип интеграции позволяет создавать связи между различными отраслями науки в процессе применения педагогической модели.

В качестве критерия содержательного компонента служит такая категория педагогической модели, которая позволила бы определять, кто из студентов достоин освоения ООП, а кто нет. Например, в качестве критерия может выступать вводимая в ВУЗах балльно-рейтинговая система оценки знаний. То есть в течение семестра, студенты, накапливая бонусы за определенные виды работ к экзаменационной сессии, уже знают будущую оценку на экзамене. При такой системе «ленивые» студенты как бы они не старались во время сессии, при недостаточном количестве набранных баллов, уже не смогут претендовать на хороший результат.

Третьим компонентом педагогической модели является технологический компонент, включающий в себя методы, средства, формы и технологии обучения. **Т**ехнологический компонент характеризуют способы и приемы взаимодействия участников образовательного процесса, активное использование современных технических и компьютерных средств обучения, обеспечивающих решение различного рода педагогических задач.

В заключении идет релаксационно-оценочный компонент.

Данный компонент направлен на выявление уровней активности и самостоятельности в овладении способами и средствами в осуществлении релаксационной деятельности и выполняет функцию подведения итогов выполненных действий.

Анализируя интегрированную схему, изображенную на рис.1, можно заметить, что именно, благодаря предложенной педагогической модели возможна качественная реализация требований ФГОС при подготовке инженерных кадров к ИИД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования направления подготовки дипломированного специалиста 660300 «Агроинженерия». Утв. 05.04.2000 №312 с/дс.
2. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению 110800 «Агроинже-

нерия» квалификация (степень) бакалавр. Гос. регистр. № 552 от 09.11.2009.
3. О.П. Кучина. Управление мотивационно-целевым развитием студентов при обучении в вузе.// Актуальные вопросы современной психологии и педагогики. Материалы VI-ой международной научной заочной конференция. Липецк, 2011. – С. – 208 – 211.
4. А.К. Маркова, Т.А. Матис, А.Б. Орлов. Формирование мотивации учения: кн. для учителя / – М.: Просвещение, 1990. – 192 с.
5. Сластенин В.А. [и др]. Педагогика: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений / В.А. Сластенин, И.Ф. Исаев, Е.Н. Шиянов; Под ред. В.А. Сластенина. - М.: Издательский центр "Академия", 2002. - 176 с.
6. А.Д. Урсул. Устойчивое развитие цивилизации и образование в XXI веке // Зеленый крест. 1995. №4. С.43
7. Боброва Г.В. Мотивационно-целевое развитие воспитанников как компонент опережающего образования на примере кафедры физической культуры. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://nsportal.ru/shkola/dopolnitelnoe-obrazovanie/library.
8. Н.И. Наумкин, Е.А. Нуянзин. Подготовка студентов к инновационной деятельности (ИИД) на основе ФГОС в условиях национально-исследовательских университетов // Физическое образование: проблемы и перспективы развития. Материалы XII международной научно-методической конференции. М.: МПГУ, 2013. С.162 – 166.
9. Наумкин Н.И. [и др.]. Особенности подготовки студентов к инновационной деятельности // Тракторы и сельхозмашины, 2012, №10. С.53 – 55.
10. Наумкин Н.И., Грошева Е.П. Педагогическая модель подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности при обучении техническому творчеству // Интеграция образования. – 2010. – №2 (59). – С. 26 – 30.
11. М.С. Бундур, П.П. Петков. Совершенствование учебных программ подготовки бакалавров и магистров-механиков / Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2 международной научно-практической конференции. СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 25–29.

УДК 745/749

Т.А. Никитина

ОПЫТ АНАЛИЗА И ИНТЕРАКТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ КОЛОРИСТИКЕ ДИПЛОМИРОВАННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ



Татьяна Александровна Никитина, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Санкт-Петербург, Россия. Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: nik_tatiana@mail.ru

Аннотация

Рассматривается опыт обучения колористике в рамках повышения квалификации специалистов, занимающихся разработкой и изготовлением наукоемкого вакуумного технологического оборудования, в том числе для нанотехнологий.

Ключевые слова: колористика, вакуумное оборудование, интерактивное обучение

T.A. Nikitina

EXPERIENCE OF THE ANALYSIS AND INTERACTIVE TRAINING OF COLORING FOR GRADUATES IN THE VACUUM TECHNOLOGY

Dr. Tatiana A. Nikitina, St. Petersburg Polytechnical University,
Polytechnicheskaya, 29, St-Petersburg, 195251, Russia
Phone: 812-552-75-14

Abstract

Considering the experience of the training of coloring in the context of the qualification improvement of specialists, involved in the design and manufacturing of high-tech vacuum equipment, including for nanotechnology.

Key word: coloring, vacuum equipment, interactive training

Цвета и их сочетания используются в технике как символы, заменяющие целые понятия и регламентирующие правила поведения. Правильная окраска производственного оборудования обеспечивает повышение производительности труда и снижение травматизма, уменьшает зрительное напряжение, способствует поддержанию чистоты рабочего места. Неудачное цветовое решение делает, порой, неконкурентоспособным само изделие.

Грамотное и обоснованное применение цвета в дизайне вакуумного оборудования часто оказывается не менее важным, чем проектирование особенностей формы разрабатываемой конструкции. Вакуумная техника активно используется в самых разных сферах деятельности: пищевая и электронная промышленность, медицина, транспорт, машиностроение, предприятия горнодобывающей и химической отраслей, научно-исследовательские институты, сельское и коммунальное хозяйство. Во всех перечисленных сферах деятельности с этим оборудованием работают люди, оно может быть источником опасности или дискомфорта. При этом техника экспортируется в другие страны, участвуя в конкурентной борьбе на рынке.

В настоящее время на ряде предприятий города (ЗАО «НТО» SemiTEq и др.), специализирующихся в области вакуумной техники, ведутся работы по созданию нового поколения установок, по техническим характеристикам не уступающих аналогичному оборудованию ведущих зарубежных фирм. Для повышения конкурентоспособности такого оборудования возникла необходимость в их дополнительной дизайнерской проработке. В рамках программы повышения квалификации в области промышленного дизайна разработчиков такого оборудования автором разработан и прочитан лекционный курс и проведено практическое занятие по колористике вакуумного оборудования.

В теоретическом курсе на примере объектов вакуумной техники рассмотрены основные положения колористики, необходимые для формирования цветовой грамотности при выборе цветового решения оборудования [1, 3].

Несмотря на то, что цвет является одним их самых субъективных средств композиции, специалист, разрабатывающий современную наукоемкую вакуумную технику, должен знать особенности цветов, цветовых сочетаний и их закономерностей. Важно, чтобы процесс выбора цвета проходил не по наитию на основе собственного, интуитивно сформированного цветового вкуса и чувства цвета, а с применением теоретических знаний о цвете [2]. В лекционном материале показаны факторы, влияющие на выбор цветового решения. Выделено несколько положений, которыми следует руководствоваться при выборе цветовой гаммы промышленного изделия. В процессе обучения проводился анализ существующих колористических решений объектов вакуумной техники. Рассматривались традиционные характерные для вакуумного оборудования цветовые решения: использование всех оттенков синего, голубого и фиолетового цветов в сочетании с серым, серебристым и черным. Обсуждались возможные альтернативные цветовые решения, их достоинства и недостатки. Отмечались современные цветовые тенденции в окраске производственного оборудования.

Приведены примеры применения сигнальных цветов в объектах вакуумной техники. Это обусловлено тем, что эксплуатация такого оборудова-

ния может быть связана с рядом опасностей, к которым можно отнести опасность поражения электрическим током, наличие горячих или холодных поверхностей, травмы от подвижных механических частей и т.д. Для привлечения внимания людей к непосредственной или потенциальной опасности применяют сигнальные цвета. Их использование регламентировано стандартом.

Современное вакуумное наукоемкое оборудование, например установки молекулярно лучевой эпитаксии, магнетронного напыления или плазмохимического травления, могут представлять собой частично открытую или полностью закрытую конструкцию.

Цветовое решение закрытых конструкций определяется, главным образом, цветом корпуса и панелей управления. Если установка имеет большие и насыщенные панели управления с множеством кнопок, объединенных в функциональные группы, то ее цвет определяется контрастным цветовым решением сложных элементов управления, диктуемым требованиями эргономики [4, 5].

Для многих промышленных вакуумных установок характерно сочетание лаконичных закрытых объемов (оснований, шкафов, пультов управления) со сложной открытой конструкцией с большим количеством трубопроводов, кабелей и шлангов. При этом в одном оборудовании встречаются конструктивные элементы и модули, выполненные из разных по цвету материалов: медь, титан, нержавеющая сталь, керамика, пластмасса, стекло. Кроме того, большие сложные установки часто включают в себя элементную базу и функциональные модули различных изготовителей со своим фирменным стилем. Все это во многом осложняет процесс выбора колористического решения, в котором цвет является не только средством композиции, а служит решению, прежде всего, функциональных задач.

После усвоения теоретического курса перед слушателями ставилась задача применить полученные знания по цветовой грамоте в практической работе по выбору гармоничных цветовых сочетаний на примере объектов вакуумной техники.

В первой части практической работы слушатели выполняли абстрактно-геометрические композиции по различным видам цветовых гармоний и сочетаний, используемых в вакуумной технике. Ставилась задача правильно подобрать цвета по количеству и цветовому тону. Задания выполнялись в технике аппликации. Слушатели получали наборы карточек из цветной плотной бумаги. Цвета карточек были подобраны с учетом наиболее часто встречающихся цветов вакуумного оборудования.

Во второй части практической работы перед слушателями ставилась задача отработать умение применять знания по цветовой грамоте в практической работе, предложив варианты цветовой окраски объектов вакуумной техники. Для этого автором были подготовлены фронтальные изображения разномасштабных объектов вакуумной техники в виде линейного рисунка

на листах формата А4 для возможного представления их цветовых решений в технике аппликации: установка магнетронного напыления, автоматизированная система электронно-лучевого напыления и проч., а также различные вакуумные насосы.

Такой подход обеспечивает существенные преимущества в условиях коротких занятий: избавляет слушателей от необходимости работать с красками и самостоятельно изображать сложные промышленные объекты, позволяет просмотреть и обсудить большое количество вариантов цветового решения, способствует успешному решению слушателями прикладных задач по цветомоделированию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитина Т. А. Цветоведение и колористика. Учебное пособие. Кн.1 и Кн.2.– СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2008. – с., ил.
2. Никитина Т.А. Исторический опыт и актуальные аспекты в обучении цвету студентов дизайнеров// «Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Международной научно-практической конференции._СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.- С 103-107
3. Промышленный дизайн: учеб. пособие/ под ред. В.А.Дьяченко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 241 с. – Вакуумная техника. Коллектив авторов: Д.А. Вавилова – п. 1.1, Т.А. Никитина – п.1.3., Д.В. Мареев – п. 3.3 и 3.5, А.Б. Смирнов – п. 1.4, В.А. Дьяченко – остальное.
4. Проектирование и моделирование промышленных изделий: Учебн. для вузов/ С.А. Васин, А.Ю. Талащук, В.Г. Бандорин и др.; под ред. С.А. Васин. – М.: Машиностроение, 2004 – 692., ил.
5. Сомов Ю.С. Композиция в технике – 3-е изд.: перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1987 – 288 с.

УДК 378.1

Л.М. Ображей, Н.Г. Танкаян

ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ ПОДГОТОВКЕ БАКАЛАВРОВ



Людмила Михайловна Ображей, к.т.н., доцент, заведующая кафедрой «Техническая механика и инженерная графика». Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академия,
тел. 8(812) 234-36-35



Нина Григорьевна Танкаян, преподаватель
Санкт-Петербургский государственный лицей им. Б.В. Иогансона,
Россия, Санкт-Петербург тел. 8(812) 644-13-60

Аннотация

Доклад посвящен рассмотрению составляющих процесса обучения, задачам, которые необходимо решить для активизации процесса обучения в целом и естественнонаучного обучения, в частности, рассматриваются необходимые условия – владение преподавателем всеми формами и средствами обучения, вопросами повышения уровня мотивации и познавательной активности обучаемых.

Ключевые слова: обучение в вузах, цели обучения, содержание обучения, формы обучения, методы обучения, естественнонаучная подготовка, активизация процесса обучения, мотивация.

L. Obrazhey, N. Tankayan

THE WAYS OF INTENSIFICATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS IN THE NATURAL BACHELORS

Ludmila M.Obrazhey[1], Phone 8 (812) 234-36-35;
Nina G.Tankayan[2], Phone 8 (812) 644-13-60.
[1]St.Petersburg State Chemical-Pharmaceutical Academy, Russia;
[2]St. Petersburg State Lyceum B.V. Johanson, Russia.

Abstract

Report is devoted to the components of the learning process, the tasks that need to be addressed to enhance the learning process in general and science edu-

cation in particular. Considered necessary tenure teachers in all forms and means of education, on increasing the motivation and cognitive activity of students.

Key words: Training in high schools, learning objectives, learning content, forms of training, teaching methods, natural-scientific training, the activation process, motivation

Перестройка высшего образования естественно связана с глубокими изменениями целей, содержания, форм и методов обучения.

Как известно, обучение складывается из четырех составляющих:

1) учебной информации, т.е. содержания образования, которое должно быть четко определено в соответствии с целями обучения; в соответствии с Федеральными государственными образовательными стандартами четвертого поколения содержание информации определяется соответствующими компетенциями;
2) преподавания, т.е. деятельности обучающих;
3) учения, т.е. деятельности обучаемых;
4) материальных средств передачи учебной информации и контроля результатов обучения.

Первая составляющая отвечает на вопрос «Чему учить?», три других – на вопрос «Как учить?».

Содержание обучения складываются из:

1) обучения знаниям;
2) обучения умениям;
3) обучения навыкам;
4) обучения опыту творческой и эмоционально – оценочной деятельности;
5) обучения способам мышления.

Естественно, формирование целей обучения невозможно без выделения тех знаний, умений и навыков, которыми должен владеть специалист. Необходимо определение целей в виде конкретного перечня знаний, умений и навыков, которыми должен овладеть студент данной специальности для решения или в дальнейшем конкретных профессиональных задач.

Кроме того, известно, что сегодняшний студент может получит в вузе лишь двадцать пять – тридцать процентов того, что ему потребуется в будущей профессиональной деятельности, остальные знания ему придется осваивать уже после окончания вуза на протяжении всей его профессиональной деятельности.

Следовательно, на первый план выходит задача активизации процесса обучения, необходимость совершенствования организации обучения в свете современных методологических взглядов, достижения психологии и педагогики.

Условно различают четыре основных методов обучения:

1) объяснительно – иллюстративный;

2) репродуктивный;
3) частично – поисковый;
4) исследовательский.

Эти методы соответствуют четырем уровням познавательной деятельности человека:

1) узнаванию объектов, свойств, процессов изучаемой области, явлений действительности;
2) воспроизведению информации, действий, операций;
3) деятельности по ранее усвоенному алгоритму на определенном множестве объектов;
4) продуктивной творческой деятельности по самостоятельно конструируемым алгоритмам на любом множестве объектов.

Первые два метода непродуктивны. Это означает, что их применение не позволяет обучаемым приобретать новые знания. Два последних метода можно рассматривать как продуктивные; при их использовании обучаемый приобретает в процессе определенной творческой деятельности субъективно новые знания.

Задача интенсификации учебного процесса может быть успешно решена в современных условиях только за счет активного использования продуктивных методов обучения.

Авторам представляется особенно актуальным решение этой задачи при обучении студентов циклу естественнонаучных дисциплин (математики, физики, химии, теоретической механики) на младших курсах, где закладываются основы формирования будущего специалиста.

Очевидно, что для достижения поставленных целей преподаватель должен владеть как традиционными формами обучения (лекции, практические занятия, самостоятельная работа студентов и т.д.), средствами обучения (учебники, технические средства обучения и т.д.), приемами обучения (работа с учебником, решение задач, лабораторные работы и т.д.), так и активно усваивать и творчески применять новые формы, средства и приемы обучения.

Как же должно быть организовано обучение, чтобы его успешность была максимальной?

Остановимся на некоторых стадиях приобретения знаний, умений и навыков и опыта творческой и эмоционально–оценочной деятельности в вузе.

Громадное значение имеет одна из них – мотивация к обучению. Изменение нежелательной мотивации, формирование или усиление положительной мотивации должно идти с самого начала обучения и параллельно с обучением, т.к. без положительного отношения обучаемого к предмету невозможно достичь никаких целей обучения. «Лучшее в мире обучение не может заставить учиться учеников, относящихся к тому, чему их пытается

обучить учитель, как к чему-то абсолютно ненужному (Э. Стоунс «Психопедагогика: психологическая теория и практика обучения»).

И если часть времени преподавателя не уходит на то, чтобы помочь обучаемым увидеть, чем ему могут пригодиться изучаемые предметы, то вряд ли его усилия приведут к должному эффекту.

Различают следующие отрицательные мотивации:

– нежелание вообще учиться, что может быть вызвано опытом школьного обучения;

– отрицательная мотивация, вызванная отношением к преподавателю;

– естественная отрицательная мотивация (мотивация конкретного окружения студента, общества, например, престижа высшего образования или института и проч.)

Хотелось бы отметить и появление отрицательной мотивации, вызванной низким уровнем сформированности навыков такого особого рода деятельности, каким является обучение; низким уровнем знаний о рациональных способах и приемах учебной работы.

Задача преподавателя – постараться изменить нежелательную мотивацию, сформировать положительную, хотя это и достаточно сложно в современных условиях. Особенно это актуально в начале обучения, когда еще не у всех студентов сформировался достаточно высокий уровень положительной мотивации к обучению или вообще мотивация. Здесь и необходимо при изучении теоретической механики, физики и других дисциплин естественнонаучного цикла показать студентам, чем им могут пригодиться изучаемые предметы, обозначив их связь с будущей профессиональной деятельностью специалистов, приведя конкретные примеры их применения.

Исключительно важным для создания положительной мотивации к обучению является создание при обучении благоприятной атмосферы – важнейшего фактора в обучении. Бесплодны попытки разделить в задачах обучения такие две категории, как мышление и чувства. Более того, имеются неоспоримые доказательства, что для успешного обучения аффективная область – наиболее важная из всех. Атмосфера конфликта – вредная для обучения.

Естественным выводом из сказанного является то, что преподаватель должен владеть знаниями в аффективной области.

При правильной организации учебной деятельности параллельно с процессом усвоения знаний должен идти процесс их применения; фактически само усвоение знаний идет как процесс их применения.

Представляется, что параллельно с процессом обучения конкретным знаниям должен идти процесс обучения способам мышления (или процесс формирования мышления). И это представляется даже гораздо более важным. Считаем, что заниматься этим исключительно важно именно с млад-

ших курсов, при обучении циклу естественнонаучных дисциплин, в наибольшей степени способствующих формированию мышления.

Очень важно создавать новые способы мышления, а не довольствоваться теми, которые имелись у учащихся к началу обучения в вузе.

Признаком осмысленного учения является умение связать вновь усвоенное с уже сложившейся системой понятий, применение понятий в ситуациях, отличных от тех, в которых эти понятия усваивались.

Что касается контроля и оценки обучения, то они должны стать частью системы обучения. Четкая постановка учета успеваемости студентов (это может быть рейтинговая система) является одним из обязательных условий стимулирования их познавательной активности.

Оценка эффективности процесса обучения обычно исключительно сложна из-за отсутствия четкости в определении целей и задач обучения. Лишь немногие из множества тестов, оценивающих конечный результат обучения, позволяют оценить навыки более высоких уровней. Поэтому при подготовке тестов требуется особая осторожность с тем, чтобы в тестах были отражены все навыки, относящихся к задачам обучения, т.е. четко отражено содержание образования.

Итак, основными выводами из изложенного являются следующие: для достижения целей, стоящих перед современным высшим образованием, преподаватель должен не только владеть всем комплексом форм, средств, методов и приемов обучения, не только владеть психологической теорией, но и творчески применять её в практике обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потеев М.И. Практикум по методике обучения в вузах. – учебное пособие.–М.: Высшая школа, 1990 – 207с.
2. Л.М. Ображей, Н.Г. Танкаян. Опыт и перспективы использования коллективного способа в процессе обучения // Перспективы развития науки и образования: Материалы международной научно-практической конференции. – Тамбов. Изд-во ТРОО «Бизнес Наука-Общество», 2012. – С.103–105.
3. Л.М. Ображей, Б.Е. Саморуков. Мотивация в обучении // Высокие интеллектуальные технологии образования и науки: Материалы IV Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 1997. – С.47-48.
4. Д.П. Козликин, М.М. Радкевич. Особенности подготовки бакалавров по новому федеральному государственному образовательному стандарту // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. – С.47-50.

5. В.В. Бадалов. Давно пора // Современное машиностроение Материалы Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. – С.22-23.
6. С.Н. Степанов, С.Б. Тарасов. Измерение и качество // Современное машиностроение. Материалы Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. – С.87-93.
7. А.А. Суханов. Оптимизация подготовки специалистов в современных условиях // Современное машиностроение. Материалы Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. – С.98-104.
8. Д.В. Волощинов, Е.П. Болецова. О проблемах воспитания графической культуры у студентов младших курсов специальности «Промышленный дизайн» как средство изучения и проектирования пространственной формы объекта // Современное машиностроение. Материалы Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. – С.29-31.
9. Л.М. Ображей. Методические аспекты преподавания курса «Механика» студентам – технологам // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах. Материалы XI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. – СПО.: Изд-во Политехнического университета, 2007. – С. 378-380.
10. Л.М. Ображей, Н.Г. Танкаян. Вопросы сквозного контроля знаний при подготовке в вузы // Актуальные вопросы качественного образования в высшей школе. Материалы вопросы качественного образования в высшей школе. Материалы международной дистанционной учебно-методической конференции. – Пермь.: Изд-во ГОУ ВПО ПГМА им. Е.А. Вагнера. Росздрава, 2009. – С. 143.
11. Л.М. Ображей. Об организации студенческой научной работы на кафедре технической механики и инженерной графики // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах. Материалы XII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. – С. 220-221.
12. Л.М. Ображей, Н.Г. Танкаян, Н.В. Бугеро. Проблемы и перспективы довузовской подготовки // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науки. Материалы XVII Международной научно – методической конференции. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. – С. 254-255.

УДК 539+378.1

Л. К. Паршин

О ДВУХУРОВНЕВОМ ОБРАЗОВАНИИ



Лев Константинович Паршин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Россия, Санкт-Петербург, Политехническая, 29
Тел.: (812)123-4567.

Аннотация

Переход на двухуровневую подготовку в высшей технической школе заметно сокращает возможности выпускников в конструкторской деятельности.

Ключевые слова: урон в конструкторской деятельности

L. K. Parshin[1]

ABOUT TWO-LEVEL EDUCATION SYSTEM

[1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

The transition to a two-level education system significantly reduces the possibility of graduate students in the design activities.

Key words: Damage in the design activities

В России уже 20 лет идёт процесс замены системы высшего технического образования, доставшейся нам в наследство от царской России и от Советского Союза, на другую, более экономную, которую стали принимать европейские страны по очень энергичному совету, исходящему от США. В частности, о подобных действиях отчётливо высказался в частной беседе профессор Альтенбах, шеф-редактор всемирно известного журнала «Прикладная математика и механика». Этот процесс в Германии встречает сопротивление не только со стороны студенчества и преподавателей, но и со стороны промышленников.

Экономия, видимо, имеется, но по сравнению с потерями казны от недобросовестных чиновников – это пустяк. В данной же работе предполагается рассмотреть техническую сторону проблемы.

Отечественная система в XIX, XX веках развивалась в русле общеевропейской научной и научно-педагогической мысли. Наиболее впечатляющим был пример Франции. Там на рубеже XVIII и XIX веков была основана Политехническая школа, в которой студенты в течение двух лет изучали основы математики и физики. Затем студенты расходились по специализированным высшим учебным заведениям. В частности, одним из самых востребованных оказался Институт мостов и дорог. В Германии подобная система высшего технического образования применялась в одном втузе (политехникум, политехнический институт, технический университет и т.п.). В Петербурге в 1809 году был основан Институт инженеров путей сообщения при содействии таких выдающихся французских инженеров, как О. Бетанкур (первый директор Института), П. Базен, Ф.Потье. В 20-х годах здесь работали получившие впоследствии мировую известность молодые французские инженеры Г.Ламе и Б.Клапейрон [1].

При переходе с подготовки инженера за 5.5 лет на подготовку бакалавра в 4 года приходится в учебные планы запихивать специальные дисциплины за счёт времени, отводимого ранее на фундаментальные дисциплины. Наибольший урон понесли курсы математики, начертательной геометрии, физики, химии. Да и сами специальные дисциплины существенно похудели, стали исчезать курсовые проекты. В инженерно-строительном институте СПбГПУ по некоторым специальностям в 1,5-2 раза срезали время, отведённое на сопротивление материалов, а в учебных планах одной из специальностей вообще исчез курс теоретической механики. В итоге учебные планы Политехнического университета стали напоминать учебные планы советских техникумов, задача которых – подготовка среднего технического персонала и квалифицированных рабочих. А где теперь будут готовить инженеров-конструкторов, инженеров-проектировщиков?

Магистерская подготовка на ущербной базе фундаментальных дисциплин не сможет выйти на уровень подготовки, осуществлявшейся ранее на полноценной основе фундаментального образования. Здесь же дополнительно следует напомнить о негативных результатах реформ в средней школе. Наибольший урон общему образованию нанесло введение ЕГЭ. Согласно требованием такого экзамена на первый план выходит зубрёжка, а способности мыслить, способности решать задачи остались по существу невостребованными. А без этого не может быть полноценного инженера-конструктора.

А как обстоят дела в США, в стране, где двухуровневая подготовка инженеров является преобладающей? Как сами американцы оценивают свою систему высшего технического образования? Здесь следует напомнить о некоторых фактах из относительно недавней истории.

В 1958 году в советские вузы из США были направлены несколько комиссий. В каждой такой комиссии было 5-6 крупных профессоров, а во главе состоял конгрессмен или сенатор. Одним из членов комиссии, которая была принята в Ленинградском политехническом институте, был С.П.Тимошенко. Он один из авторитетнейших механиков XX века, чело-

век, который за полвека до этого принимал участие в разработке учебных планов по механике в нашем, только что созданном Политехническом институте, с 1928 года иностранный член-корреспондент АН СССР. Ознакомившись с нашими учебными планами, С.П.Тимошенко с удовлетворением признал, что в СССР сохранена и получила развитие российская система высшего политехнического образования. Дополнительно он отметил высокий уровень курсовых и дипломных проектов на гидротехническом факультете [2]. В заключительной беседе в ректорате ЛПИ председатель комиссии клялся и божился, что он в США добьётся пересмотра учебных планов втузов по советскому примеру.

В том же 1958 году Начальник Корпуса военных инженеров США (крупнейшей американской гидростроительной организации) генерал Инчер в своём обстоятельном докладе перед сенатскими комиссиями по внутренним делам и общественным работам сопоставил достижения СССР с работой, проводимой в США. Сравнение было явно не в пользу США [3].

Аналогичный характер имеют заявления американских сенаторов, посетивших в 1959 году несколько действующих и строящихся ГЭС в СССР: «…Русские занимают сейчас ведущее место в мире по производству гидроэлектроэнергии. У русских создана новая техника строительства ГЭС. Темпы электрификации в СССР выше американских. СССР имеет большие преимущества в передаче электроэнергии на дальние расстояния. СССР передаёт другим странам свой богатый опыт строительства плотин, электростанций, а также экспортирует в большое число стран электроэнергетическое оборудование новейших типов…». В заключение высказывались опасения, что в 80-х годах СССР может обогнать США в производстве электроэнергии.

Для беспокойства американских государственных деятелей были и другие более весомые достижения науки и техники в СССР. В 1956 году на международной научной конференции руководитель Атомного проекта СССР И.В.Курчатов рассекретил отечественные теоретические и экспериментальные разработки в области управляемого термоядерного синтеза. В его докладе, в частности, было дано описание действующей экспериментальной установки «Токамак» (ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками). Подобные установки (с тем же названием!) эксплуатируются и сейчас, в XXI веке в ведущих мировых исследовательских центрах.

Запуск же первого искусственного спутника Земли в 1957 году продемонстрировал впечатляющую мощь отечественного ракетно-космического комплекса.

Относительно упомянутого выше обязательства изменить систему американского высшего технического образования А.Аронов, член-корреспондент АН СССР, сотрудник Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе, физик-ядерщик сказал следующее. Некоторые изменения имели место, но лишь в 10-20 ведущих втузах, готовящих специалистов по ядерной тематике, по проблемам ракетно-космического комплекса и вычислительной техники. Существенно были увеличено внимание к изуче-

нию на первых двух курсах математики и физики. В остальном же можно было видеть изменения лишь косметического характера.

Вместе с этим можно задать вопрос: почему при такой экономной системе высшего технического образования США до сих пор являются наиболее развитой промышленной страной в мире? Здесь не всё так просто. В тени, например, остаётся вопрос об импорте инженеров в народное хозяйство США. В 20-50-х годах выпуск собственных инженеров достигал 100-120 тысяч в год, импорт же устойчиво держался на уровне 10 тысяч в год. Вербовали уже сложившихся специалистов в возрасте не моложе 30-35 лет, в основном из Европы. В этих действиях американские фирмы успешно использовали подавляющее превосходство своей страны в финансовой сфере, что позволяло им предлагать инженерам высокую зарплату. Добавим, что в конце XX века существенно увеличился поток инженеров из СССР и России. Например, Билл Гейтс глава транснациональной монополии Майкрософт обмолвился несколько месяцев тому назад в телевизионном интервью, что в самом верхнем техническом эшелоне его империи работает много инженеров с советскими и российскими дипломами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Двухуровневая система высшего технического образования по сравнению с российско-советской системой фактически сжимает с 5,5 до 4 лет преподавание основных инженерных дисциплин и особенно дисциплин фундаментальной подготовки.
2. Дополнительные два года магистратуры, во-первых, не имеют существенной инженерной направленности, во-вторых, заметна тенденция сокращения бюджетных мест, что ограничивает доступ к высшему образованию людей из демократических слоёв общества.
3. При двухуровневой системе существенно сокращается объём преподавания фундаментальных общетеоретических дисциплин, что ограничивает возможности выпускников в конструкторско-проектной деятельности. По существу, это обычный порядок для традиционной банановой республики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов. – М.: Гостехтеориздат, 1957. – 536 с.: ил.
2. Тимошенко С.П. Воспоминания. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1992. – 422 с.
3. Engineering News Record, 1958, V. 160, №9, P. 24.

УДК 621.01

Ю.А. Семенов, Н.С. Семенова

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ



Юрий Алексеевич Семенов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.; (812)345-1622, E-mail: tmm-semenov@mail.ru



Надежда Сергеевна Семенова, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.; (812)345-1622, E-mail: tmm-nss@yandex.ru

Аннотация

Рассматривается опыт преподавания раздела теории механизмов и машин "Геометрия рычажных механизмов". Приведены примеры геометрического анализа замкнутых кинематических цепей с одной и с несколькими степенями подвижности.

Ключевые слова: функция положения, сборка, конфигурация, особое положение

Yu. A. Semenov, N. S.Semenova

GEOMETRIC ANALYSIS OF PLANAR MECHANISMS

Dr. Yury A. Semenov[1], e-mail: tmm-semenov@mail.ru
Dr. Nadezhda S. Semenova[1], e-mail: tmm-nss@yandex.ru
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The teaching experience of the course “Geometric analysis of lever mechanisms” is discussed in the current paper. Examples of geometric analysis of closed kinematic chains with one and multiple degrees of mobility are offered. The problem of possible assembly modes and configurations of the mechanism is considered.

*Key words***:** function position, assembly, configuration, singylar position

Предлагаемый доклад посвящен вопросу преподавания одного из разделов курса ТММ и является продолжением опубликованного ранее цикла работ [1-4]. Ранее были затронуты вопросы составления и решения уравнений геометрического анализа [2]. Было показано, что уравнения геометрического анализа, составленные для замкнутых кинематических цепей, являются тригонометрическими или алгебраическими нелинейными уравнениями. Если они и имеют решение, то оно, как правило, является не единственным. Несколько решений системы геометрических уравнений означают, что при заданных входных координатах и заданном положении неподвижных шарниров механизм можно собрать несколькими способами, т.е. существует несколько монтажных схем механизма. Монтажные схемы, которые не могут перейти к другим монтажным схемам без их разборки, назывались *сборками механизма.*

В качестве примера рассматривался шарнирный четырехзвенник (рис. 1, *а*). Были рассмотрены три схемы механизма. В первой схеме обнаружилось два решения, соответствующие двум сборкам механизма. На рис. 1, *б* эта схема обозначена соответствующей цифрой.

а) *б*)

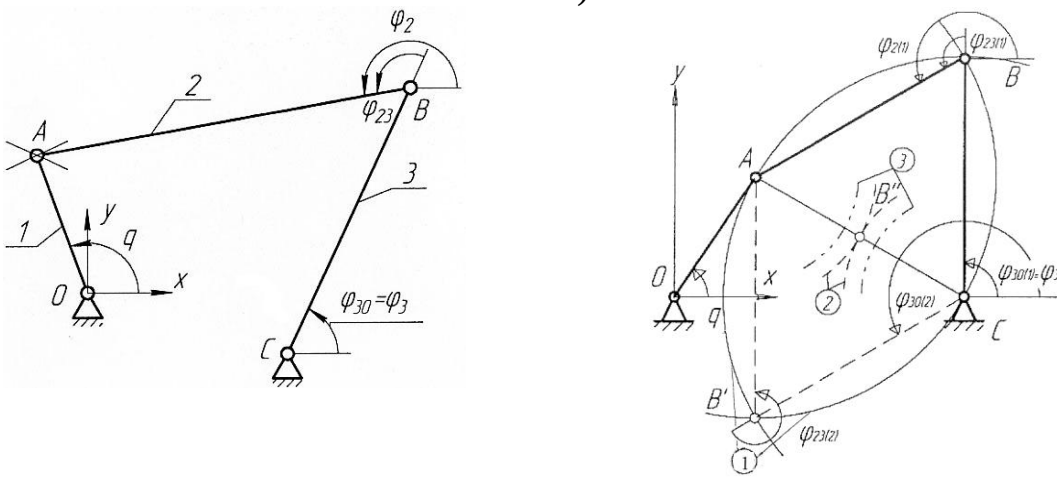


Рис. 1.

Во второй схеме геометрические уравнения имели два кратных корня, т.е. две сборки слились в одну. Этому условию отвечали те положения механизма, при котором точки *A, B″* и *C* лежат на одной прямой. Такие положения назывались особыми. В этих положениях входная координата q перестает быть независимой, т.е. происходит потеря единственной степени подвижности; неслучайно особые положения в одноподвижных механизмах называются мертвыми.

В третьей схеме корни геометрических уравнений были мнимые; это означает, что имеет место разрыв кинематической цепи механизма, т.е. механизм не существует.

Для того чтобы оценить функциональные возможности механизма необходимо исследовать функцию положения выходного звена, например,

$\varphi_3(q)$ шарнирного четырехзвенника. Такое исследование включает в себя несколько этапов.

На первом этапе устанавливается, в какой области функция положения определена и имеются ли у нее разрывы. Значения постоянных параметров кинематической схемы механизма определяют *область существования* искомой функции. Для нахождения этих областей определяются *первые и вторые производные от функций положения по независимым переменным* $q_1, q_2, ..., q_n$. Эти производные зависят только от геометрических параметров механизма; подробно они будут рассмотрены ниже.

Разрыв функции положения означает, что *механизм не существует в виде замкнутой кинематической цепи*. Разрыва не произойдет, если будут существовать все структурные группы. Для этого необходимо, чтобы в решениях уравнений подкоренные выражения были неотрицательными, а синусы и косинусы определяемых углов по модулю не превосходили единицу.

На втором этапе исследования определяются точки, в которых *первые производные от функций положения не существуют*. Этим точкам соответствуют *особые положения* механизмов. При заданных постоянных параметрах кинематической схемы особые положения могут и не наступить. Тем не менее, их определение является полезным, поскольку позволяет судить о близости механизма к особым положениям, где существенно затруднена передача движения и сил.

На третьем этапе геометрического анализа определяются *экстремумы функции положения*. Из найденных экстремумов разыскивают наибольшее и наименьшее значения функции, соответствующие *крайним* положениям механизма. Алгебраическая разность наибольшего и наименьшего значения функции определяет *ход* выходного звена механизма. Чем больше число экстремумов, тем выше функциональные возможности механизма. При задании постоянных параметров кинематической схемы иногда реализуются не все экстремумы. В частности, при соответствующем наборе постоянных параметров функция положения может быть *монотонной*.

Для исследования функции положения $\varphi_3(q)$ из геометрических уравнений

$$\left.\begin{aligned} \ell_3\cos\varphi_3 + \ell_2\cos\varphi_2 &= \ell_1\cos q - x_C, \\ \ell_3\sin\varphi_3 + \ell_2\sin\varphi_2 &= \ell_1\sin q - y_C \end{aligned}\right\}$$

путем их дифференцирования по q определим по правилу Крамера первую производную от функции $\varphi_3(q)$ по независимой переменной q:

$$\varphi_3' = \frac{d\varphi_3}{dq} = \frac{\ell_1\ell_2\sin(\varphi_2 - q)}{\ell_2\ell_3\sin(\varphi_2 - \varphi_3)} = \frac{J_{\varphi_3'}}{J}.$$

Несложно показать, что определитель в знаменателе выражения φ_3' совпадает с якобианом системы J геометрических уравнений:

Рассмотрим несколько частных случаев определения функции положения $\varphi_3(q)$.

1). Найдем экстремумы этой функции. Необходимым условием существования экстремума функции $\varphi_3(q)$ будет $\varphi_3' = 0$, т.е. $J_{\varphi_3'} = 0$. При этом будем считать, что $J \neq 0$. Условие $J_{\varphi_3'} = 0$ будет выполняться, если $\sin(\varphi_2 - q) = 0$. Из этого уравнения определим корни $q^* = \varphi_2^* + \pi k$ ($k = 0 < \pm 1, \pm 2, \ldots$), соответствующие двум *крайним* положениям выходного звена 3. Геометрически условие $\sin(\varphi_2^* - q^*) = 0$ означает, что звенья 1 и 2 лежат на одной прямой (рис. 2).

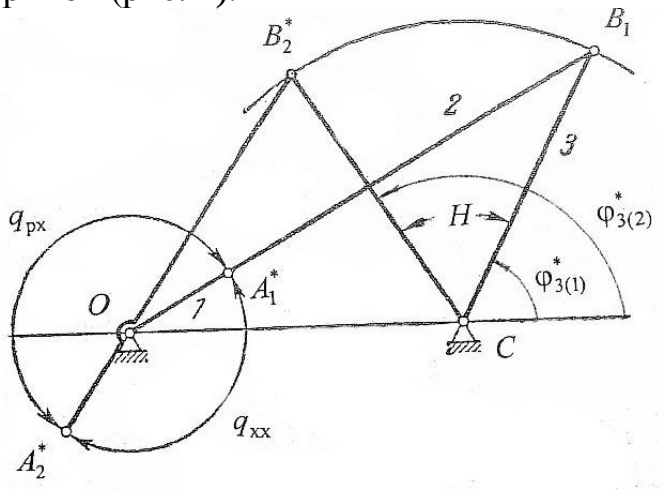


Рис. 2.

Достаточное условие экстремума функции $\varphi_3(q)$ позволяет определить ее максимум и минимум. Для этого геометрические уравнения дважды продифференцируем по q, откуда найдем

$$\varphi_3'' = \frac{\ell_2[A(q)\cos\varphi_2 + B(q)\sin\varphi_2]}{\ell_2\ell_3\sin(\varphi_2 - \varphi_3)},$$

где

$$A(q) = -\ell_1\cos q + \ell_3\cos\varphi_3 \cdot (\varphi_3')^2 + \ell_2\cos\varphi_2 \cdot (\varphi_2')^2,$$
$$B(q) = -\ell_1\sin q + \ell_3\sin\varphi_3 \cdot (\varphi_3')^2 + \ell_2\sin\varphi_2 \cdot (\varphi_2')^2,$$

Поскольку $\varphi_3''(q_1^*) > 0$, то при $q = q_1^*$ функция $\varphi_3(q)$ имеет минимум, а при $\varphi_3''(q_2^*) < 0$ функция $\varphi_3(q)$ достигает максимума. Тогда ход выходного звена определится по формуле $H = \varphi_{3\max}(q_2^*) - \varphi_{3\min}(q_1^*)$.

При некоторых сочетаниях параметров кинематической схемы шарнирного четырехзвенника функция положения $\varphi_3(q)$ является монотонной, т.е. не имеет экстремумов. Речь об этом пойдет ниже.

2). Предположим, что $J_{\varphi_3'} \neq 0$, а $J = \ell_2\ell_3\sin(\varphi_2 - \varphi_3) = 0$. Корнями этого уравнения будут $\varphi_2^* = \varphi_3^* + \pi k$ $(k = 0 < \pm 1, \pm 2, ...)$; им соответствуют два особых положения механизма. Условие $\sin(\varphi_2^* - \varphi_3^*) = 0$ геометрически означает, что звенья 2 и 3 лежат на одной прямой (рис. 3).

а) *б*)

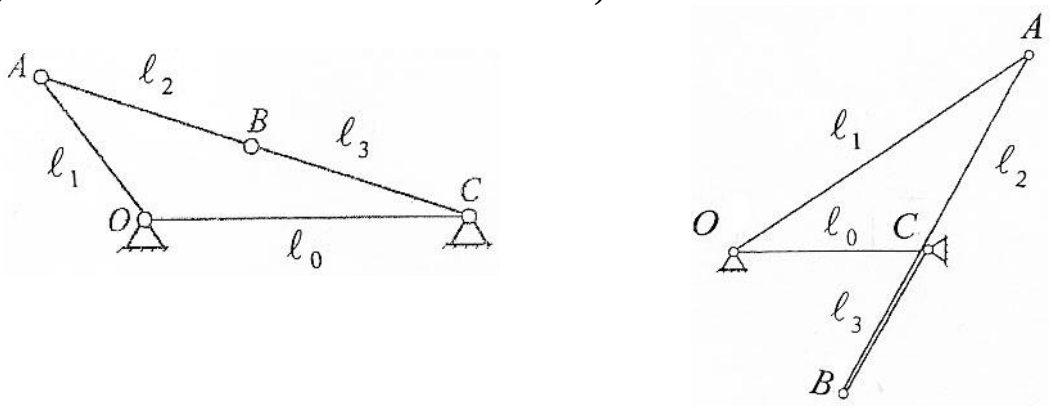


Рис. 3.

Особые положения реализуются, если будет существовать треугольник OA^*C. Из геометрии известно, что всякая сторона треугольника меньше суммы двух других сторон и больше их разности (см. рис. 3):

$$\ell_3 + \ell_2 \le \ell_1 + \ell_0; \qquad |\ell_3 - \ell_2| \ge |\ell_1 - \ell_0|,$$ где $\ell_0 = OC$.

Механизм не попадет в особое положение, т.е. будет кривошипным на отрезке $0 < q < 2\pi$, если в записанных выше неравенствах поменять знаки:

$$\ell_3 + \ell_2 > \ell_1 + \ell_0; \qquad |\ell_3 - \ell_2| < |\ell_1 - \ell_0|. \qquad (1)$$

Неравенства (1) описывают *условия существования кривошипа*. Эти условия можно получить и аналитически. Чтобы существовал кривошип, необходимо и достаточно выполнение условия:

$$-1 < \cos\varphi_{23} = [(\ell_1\cos q - \ell_0)^2 + (\ell_1\sin q)^2 - \ell_2^2 - \ell_3^2]/2\ell_2\ell_3 < 1.$$

Из правого неравенства следует

$$(\ell_1\cos q)^2 + 2\ell_0\ell_1\cos q + \ell_0^2 + (\ell_1\sin q)^2 - \ell_2^2 - \ell_3^2 < 2\ell_2\ell_3,$$

$$\ell_1^2 + 2\ell_0\ell_1\cos q + \ell_0^2 - \ell_2^2 - \ell_3^2 < 2\ell_2\ell_3,\ (\ell_1 + \ell_0)^2 < (\ell_3 + \ell_2)^2.$$

Из левого неравенства

$$(\ell_1\cos q)^2 + 2\ell_0\ell_1\cos q + \ell_0^2 + (\ell_1\sin q)^2 - \ell_2^2 - \ell_3^2 > -2\ell_2\ell_3$$

аналогично получим

$$(\ell_1 - \ell_0)^2 > (\ell_3 - \ell_2)^2;$$

тогда

$$\ell_3+\ell_2>\ell_1+\ell_0;\qquad |\ell_3-\ell_2|<|\ell_1-\ell_0|.$$

В зависимости от соотношения параметров $\ell_0, \ell_1\,\ell_2$ и ℓ_3 шарнирный четырехзвенник может быть: а) однокривошипным; б) двухкривошипным; в) двухкоромысловым.

а). В *однокривошипном* механизме $\ell_1<\ell_0$, поэтому область существования параметров кинематической схемы определяется неравенствами:

$$\ell_3+\ell_2>\ell_1+\ell_0;\qquad |\ell_3-\ell_2|<\ell_0-\ell_1.$$

В крайних положениях механизма (см. рис. 2) имеем

$$q_1^*=\arccos\frac{\ell_0^2+(\ell_2+\ell_1)^2-\ell_3^2}{2(\ell_2+\ell_1)\ell_0},\ q_2^*=\pi+\arccos\frac{\ell_0^2+(\ell_2-\ell_1)^2-\ell_3^2}{2(\ell_2-\ell_1)\ell_0}.$$

Минимум функции $\varphi_3(q)$:

$$\varphi_3^{\min}=\varphi_3(q_1^*)=\arccos\frac{(\ell_2+\ell_1)^2-\ell_3^2-\ell_0^2}{2\ell_0\ell_3},$$

ее максимум:

$$\varphi_3^{\max}=\varphi_3(q_2^*)=\arccos\frac{(\ell_2-\ell_1)^2-\ell_3^2-\ell_0^2}{2\ell_0\ell_3};$$

тогда ход выходного звена и коэффициент производительности:

$$H=\varphi_3^{\max}-\varphi_3^{\min},\ k_v=(q_2^*-q_1^*)/[2\pi-(q_2^*-q_1^*)].$$

б). В *двухкришипном* механизме справедливо неравенство $\ell_0<\ell_1$, поэтому область существования параметров кинематической схемы будет определяться неравенствами

$$\ell_3+\ell_2>\ell_1+\ell_0;\qquad |\ell_3-\ell_2|<\ell_1-\ell_0.$$

В этом случае функция положения $\varphi_3(q)$ будет монотонной.

в). Подробный анализ функции положения $\varphi_3(q)$ позволяет определить области существования параметров кинематической схемы в *двухкоромысловом механизме*:

$$|\ell_0-\ell_1|<|\ell_2-\ell_3|<\ell_0+\ell_1\le\ell_2+\ell_3,$$
$$|\ell_0-\ell_1|<|\ell_2-\ell_3|<\ell_2+\ell_3<\ell_0+\ell_1,$$
$$|\ell_2-\ell_3|\le|\ell_0-\ell_1|<\ell_2+\ell_3<\ell_0+\ell.$$

Здесь возможные пределы изменения входной координаты определяются неравенствами:

$$-\arccos[\ell_0^2+\ell_1^2-(\ell_2+\ell_3)^2]/2\ell_1<q<\arccos[\ell_0^2+\ell_1^2-(\ell_2+\ell_3)^2]/2\ell_1.$$

3). В механизме со специально подобранными параметрами, например, в спарнике электровоза ($\ell_1=\ell_3,\ \ell_2=\ell_0$), возможно положение механизма, при котором $J=\ell_2\ell_3\sin(\varphi_2-\varphi_3)=0,\quad J_{\varphi_3'}=\ell_1\ell_2\sin(\varphi_2-q)=0$

(рис. 4, *а*). Такое положение звеньев называется *крайним особым* положением механизма. При $q=0$ углы $\varphi_3=\varphi_2=0$, а в производных

$$\varphi'_2 == \frac{\ell_1\ell_3\sin(q-\varphi_3)}{\ell_2\ell_3\sin(\varphi_2-\varphi_3)}=\frac{0}{0};\quad \varphi'_3 == \frac{\ell_1\ell_2\sin(\varphi_2-q)}{\ell_2\ell_3\sin(\varphi_2-\varphi_3)}=\frac{0}{0}$$

имеет место неопределенность $0/0$. Движение механизма становится неопределенным.

Для раскрытия такой неопределенности воспользуемся правилом Лопиталя. Для удобства анализа функции производные перепишем в виде

$$\varphi'_2=\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{\sin(q-\varphi_3)}{\sin(\varphi_2-\varphi_3)},\quad \varphi'_3=\frac{1}{\beta}\cdot\frac{\sin(\varphi_2-q)}{\sin(\varphi_2-\varphi_3)},\qquad \text{где}\qquad \alpha=\ell_2/\ell_1,$$

$\beta=\ell_3/\ell_1$.

Тогда

$$\lim_{q\to0}\varphi'_2=\frac{1}{\alpha}\cdot\lim_{q\to0}\frac{[\sin(q-\varphi_3)]'}{[\sin(\varphi_2-\varphi_3)]'}=\frac{1}{\alpha}\cdot\lim_{q\to0}\frac{[\cos(q-\varphi_3)]}{[\cos(\varphi_2-\varphi_3)]}\cdot\frac{1-\varphi'_3}{\varphi'_2-\varphi'_3}=\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{1-\varphi'_3}{\varphi'_2-\varphi'_3}.$$

Аналогично определим

$$\lim_{q\to0}\varphi'_3=\frac{1}{\beta}\cdot\lim_{q\to0}\frac{[\sin(q-\varphi_3)]'}{[\sin(\varphi_2-\varphi_3)]'}=\frac{1}{\beta}\cdot\frac{\varphi'_2-1}{\varphi'_2-\varphi'_3}.$$

Очевидно, что при $q\to0$:

$$\beta\varphi'_3+\alpha\varphi'_2=1.$$

Из этого выражения найдем

$$\varphi'_2=\frac{1-\beta\varphi'_3}{\alpha},\quad \varphi'_3=\frac{1-\alpha\varphi'_2}{\beta}.$$

Подставим вторую формулу в выражение

$$\varphi'_2=\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{1-\varphi'_3}{\varphi'_2-\varphi'_3}=\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{\beta-1+\alpha\varphi'_2}{\beta\varphi'_2-1+\alpha\varphi'_2}.$$

Фактически получилось квадратное уравнение относительно φ'_2:

$$\alpha(\alpha+\beta)(\varphi'_2)^2-2\alpha\varphi'_2+1-\beta=0,$$

корни которого

$$\varphi'_{2(1)}=\frac{1}{\alpha+\beta}\left[1+\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}(\alpha+\beta-1)}\right],\quad \varphi'_{2(2)}=\frac{1}{\alpha+\beta}\left[1-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}(\alpha+\beta-1)}\right].$$

Аналогично определим

$$\varphi'_{3(1)}=\frac{1}{\alpha+\beta}\left[1-\sqrt{\frac{\alpha}{\beta}(\alpha+\beta-1)}\right],\quad \varphi'_{3(2)}=\frac{1}{\alpha+\beta}\left[1+\sqrt{\frac{\alpha}{\beta}(\alpha+\beta-1)}\right].$$

Такие же результаты были получены Ф.А. Дорониным в[5] с помощью теоремы об ускорениях точек плоской фигуры.

Наличие двух корней указывает на возможность двух движений: точка

B может двигаться либо, как точка A, образуя *параллелограмм*, либо изменить направление своего движения и пойти назад, образуя *антипараллелограмм* (рис. 4, *б*); при этом происходит смена сборки звеньев, а характер движения определяется начальными условиями, зависящими от рабочей нагрузки, сил трения, зазоров и т.п. Чтобы избежать указанной неопределенности применяют дополнительное звено 4, вносящие в систему избыточные связи.

а) *б*)

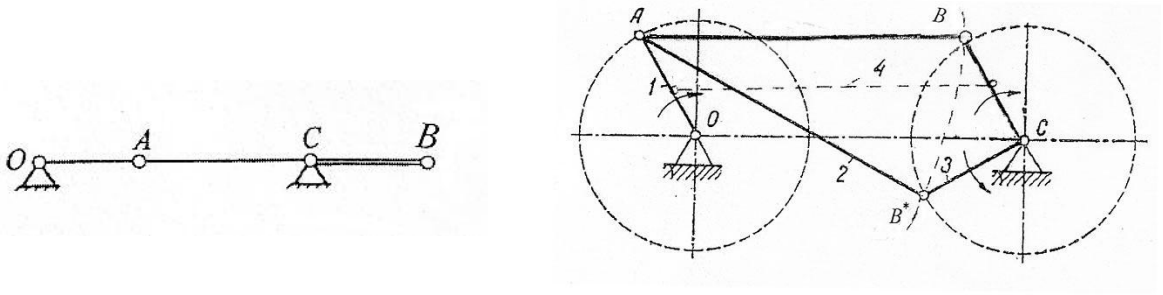


Рис. 4.

Существуют механизмы, в которых два решения геометрических уравнений соответствуют *двум возможным положениям одной и той же монтажной схемы*, например, в двигателе внутреннего сгорания. В этом случае (рис. 5) происходит переход от одного из возможных положений в другое с проходом через особое положение механизма (точки *O, A* и *B* лежат на одной прямой), что, как правило, является нежелательным. Из особого положения механизм выводится благодаря *силам инерции* (с помощью *маховика*) или *соединению* между собой *одинаковых механизмов*. При этом соединение механизмов производится так, чтобы в особом положении находился только один из них.

Одноподвижные рычажные механизмы чаще всего работают только в одной сборке. Поэтому важным является вопрос о *признаке* (*числовом показателе*), позволяющем различать сборки данной группы Ассура или данного механизма. Например, для группы *BBB* (см. рис. 1, *б*) показатель сборки можно выразить формулой

$$M = \operatorname{sign}(\sin\varphi_{23}) = \operatorname{sign}[M_C(\overline{BA})],$$

где $M_C(\overline{BA})$ – момент вектора $\overline{BA}$ относительно точки C.

В многозвенных многоподвижных структурных группах (с числом звеньев 4 и более) задача решения групповых уравнений резко усложняется. Поиск корней геометрических уравнений чаще всего осуществляется с помощью *метода Ньютона*, *метода Штурма* и пр. Определение корней геометрических уравнений возможно с помощью компьютерных программ. Авторами были решены геометрические уравнения для трехподвижного манипулятора (рис. 6) с исходными данными, взятыми из книги

[6] с помощью пакета *Mathcad*. К сожалению, не все решения, показанные на рис. 7, были найдены.

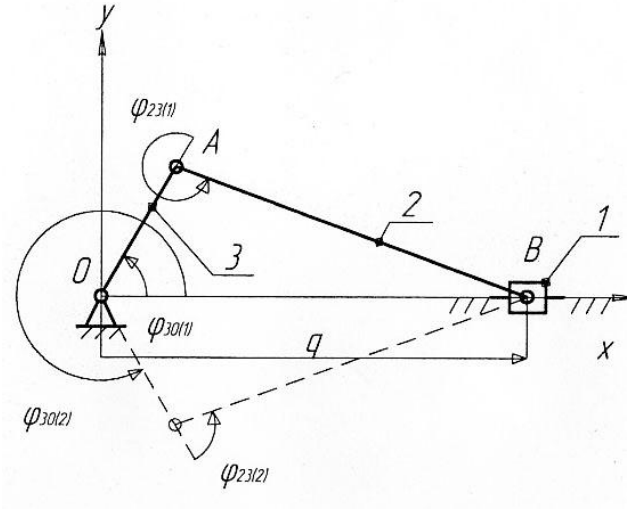


Рис. 5.

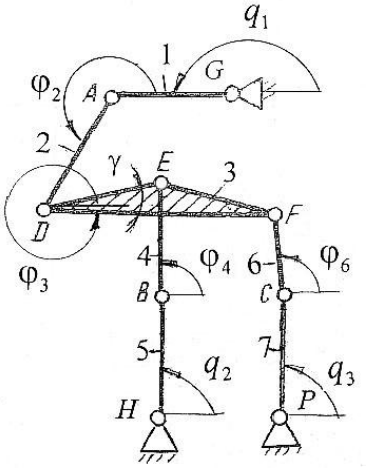


Рис. 6

В данном механизме возможен переход от одной монтажной схемы к другой без его разборки, поэтому такие монтажные схемы называются *конфигурациями*. Из рис. 7 видно, что некоторые конфигурации незначительно отличаются друг от друга; поэтому актуальным является вопрос о числовом признаке конфигурации звеньев.

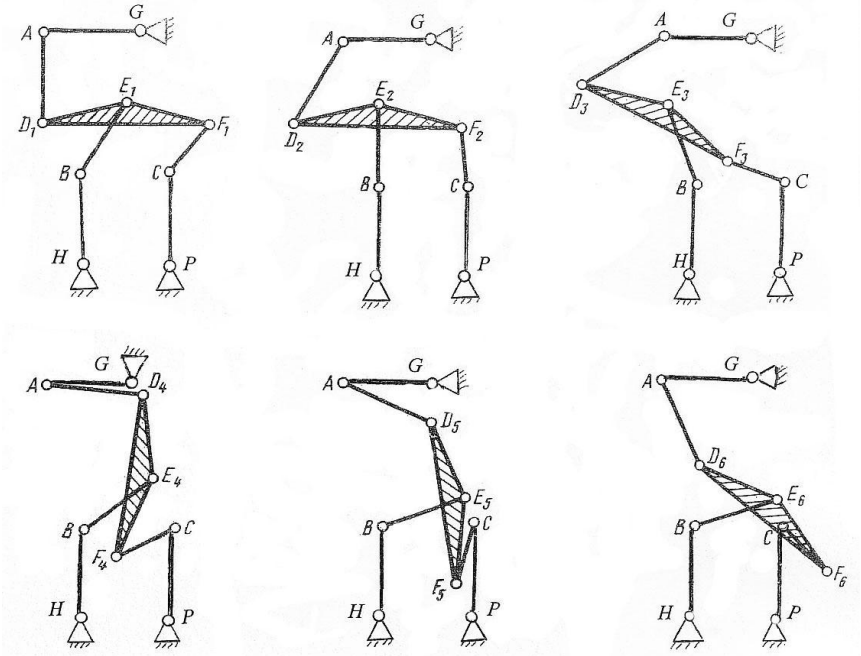


Рис. 7.

В многоподвижных механизмах актуальной является обратная задача геометрического анализа, связанная с определением входных координат от выходных параметров кинематической схемы. В [2] была решена обратная

задача для двухподвижного робота при $q_3 \equiv 0$ (рис. 8, *а*). Наличие четырех конфигураций (решений) делает этот робот более гибким по сравнению с традиционными манипуляторами. Путем изменения вида конфигурации можно сформировать расширенную зону обслуживания, состоящую из отдельных зон, обслуживаемых каждой конфигурацией (рис. 8, *б*).

а) *б*)

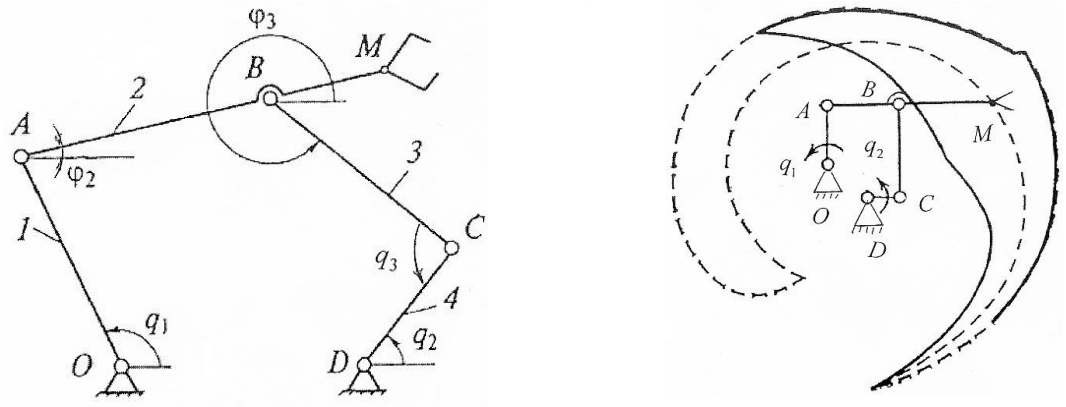


Рис. 8.

Для безразрывного перехода от одной конфигурации к другой требуется возможность перехода через особые положения, а входные звенья 1 и 4 должны совершать полные обороты, т.е. быть кривошипами. В [7,8] были получены условия существования двух кривошипов:

$$\ell_1 + \ell_0 + \ell_4 < \ell_3 + \ell_2; \quad |\ell_1 - \ell_0 - \ell_4| > |\ell_3 - \ell_2|,$$

аналогичные условию существования кривошипа в двухкривошипном четырехзвеннике.

Для устранения особых положений можно ввести дополнительный вход q_3 в шарнире *C*. При этом меняется структура механизма: входы (двигатели) q_2 и q_3 работают альтернативно: либо один, либо другой.

В процессе исследования функций положения студенты не только проводят расчеты в пакетах «Mathematica», или «Mathcad», но и пользуются программами, разработанными на кафедре «Теория механизмов и машин» СПбГТУ. Так, для повышения наглядности результатов расчётов, выполненных в программах «Excel» и «Mathcad», предложены программные средства, позволяющие создать компьютерную анимацию кинематических схем механизмов [9,10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Структурный анализ механизмов. // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 2. С. 3-14.
2. Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Геометрический анализ плоских рычажных механизмов // Теория механизмов и машин. – 2004. Т. 1. № 3 С. 26-41.

3. Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Особенности кинематического анализа механизмов с внутренними входами // Теория механизмов и машин. 2004, Т. 2. 4 С. 30-39.
4. Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Статика механизмов. // Теория механизмов и машин. 2006. Т. 4. № 8. С. 47-58.
5. Доронин Ф.А. Свободные колебания шарнирного четырехзвенника около особого положения . // Теория механизмов и машин. 2012. Т. 1. № 19. С. 24-45.
6. Пейсах Э.Е., Нестеров В.А. Система проектирования плоских рычажных механизмов. М.: Машиностроение, 1988. - 232 с.
7. Теория механизмов и машин / Коловский М.З., Евграфов А.Н., Семенов Ю.А., Слоущ А.В. – 3-е изд, испр.– М.: Академия, 2008. – 560 с.
8. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000. p. 394.
9. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Компьютерная анимация кинематических схем в программах EXCEL и MATHCAD. // Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. №11. С. 71-80.
10. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Геометрический и кинетостатический анализ плоских рычажных механизмов второго класса. // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. №2. С. 50-63.

УДК 378.1

Б.А. Смольников, В.А. Пальмов

УРОВНИ ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИЙСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТАХ



Борис Александрович Смольников, к.ф.-м.н., профессор. Санкт-Петербургский государственный политехнический Университет (СПбГПУ). Россия, Санкт-Петербург.
Тел.: (812)535-3714, E-mail: smolnikovba@yandex.ru



Владимир Александрович Пальмов, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический Университет (СПбГПУ).
Россия, Санкт-Петербург.

Аннотация

В докладе отмечается неадекватность Болонской 2-х ступенчатой системы образования потребностям российского рынка специалистов инженерно-технического профиля. Предлагается использовать для России 2-х уровневую систему типа инженер-магистр.

Ключевые слова: Болонская система, бакалавр, магистр, инженер.

B.A. Smolnikov, V.A. Palmov

EDUCATIONAL LEVELS IN RUSSIAN TECHNICAL UNIVERSITIES

Dr. Prof. Boris A. Smolnikov[1], e-mail: smolnikovba@yandex.ru;
D.Sci. Prof. Vladimir A. Palmov[1].
[1]Saint-Petersburg State Polytechnic University, Russia

Abstract

The report notes the inadequacy of the Bologna two-stage system of education for the needs of Russian market of engineers and technicians. It is proposed to use in Russia the two-level system: engineer and master.

Key words: Bologna system, bachelor, master, engineer.

Сложившаяся и укоренившаяся в Европе в конце XX века Болонская двухуровневая система образования (четырёхлетний бакалавриат и шестилетняя магистратура) была сравнительно недавно «пересажена» на россий-

скую почву. Пришло время критически рассмотреть и оценить ее первые «всходы», сопоставив их с традиционными «плодами» российской высшей школы. Ограничиваясь здесь обсуждением качества лишь инженерно-технического и физико-математического образования в советский и постсоветский период (качество гуманитарного университетского образования вряд ли заслуживает сколько-нибудь серьезного разговора), следует отметить, что оно в большой степени формировалось под давлением потребностей военной техники. Разумеется, этот перекос тормозил развитие и рост техники гражданского назначения (автомобилестроения, речного судостроения, бытовой радиоэлектроники и т.п.), что проявляется и в настоящее время, резко снижая ее конкурентоспособность на мировом рынке. Тем не менее, общий уровень технического и физико-математического образования вплоть до 90-х годов прошлого века оставался адекватным своему времени, а в некоторых крупнейших университетах СССР даже передовым (по оценкам западных специалистов). Поэтому выпускники советских вузов инженерного и научно-исследовательского профиля вполне успешно могли найти работу в западноевропейских фирмах, корпорациях и университетах. Однако после событий 1991-1992 гг. начался процесс разрушения высшего (и не только высшего) образования в России, обусловленный катастрофическим падением финансирования систем образования и науки, а также резким снижением спроса на выпускников технических вузов со стороны умирающей промышленности и производства. Начавшийся в результате этого массированный отъезд молодых (и не только молодых) специалистов из России в зарубежное трудоустройство остро поставил вопрос о согласовании российских стандартов образования и его уровней с западноевропейскими и американскими стандартами, установленными Болонской 2-х уровневой системой. К сожалению, чиновники Минобрнауки решили этот вопрос простейшим образом, механически «пересадив» Болонскую систему на российскую почву, не проведя предварительно обсуждения и согласования её с широкими кругами профессорско-преподавательского состава вузов, а также руководителей промышленности и науки. Самым печальным следствием этой «перестройки» стало почти полное исчезновение из номенклатуры технических специалистов звания и квалификации «инженер», которое на протяжении всей советской эпохи пользовалось огромной популярностью, заслуженным признанием и глубоким уважением во всех слоях общества. Именно инженер стал тем краеугольным камнем советской индустрии и создателем тех научно-технических достижений, которые подняли и прославили страну как мощную промышленную державу, несмотря на воцарившееся в ней политическое и социальное мракобесие. Многие выдающиеся советские ученые (А. И. Лурье, Л. Г. Лойцянский и др.) с гордостью называли себя инженерами и с энтузиазмом ставили и решали актуальные инженерно-технические задачи. Не случайно вся система инженерно-технического

образования в СССР базировалась на 5 – 5,5-летнем сроке обучения, позволявшем наряду с серьезным изучением фундаментальных физико-математических дисциплин (на 1–3 годах обучения) осваивать и целый ряд прикладных инженерных курсов, непосредственно привязанных к актуальным проблемам текущего развития техники. Именно такое совмещение инженерного дела с научными знаниями породило блестящее поколение конструкторов, инженеров и ученых, которые на протяжении 30-х-80-х годов XX века создали передовую военную технику, энергетику, подводное судостроение и открыли дорогу в Космос.

Обращаясь теперь к новоиспеченной (для России) 2-х уровневой системе обучения студентов, можно отметить, что 6-летний магистерский уровень вполне адекватен целям подготовки специалистов высокой квалификации в самых разных направлениях науки, техники и естествознания, а также целям дальнейшего поступления в аспирантуру. Что же касается 4-летнего бакалаврского уровня, то он вызывает серьезные сомнения в своей целесообразности в российских условиях. Учитывая, что как правило, первые 3 года обучения бакалавры проходят совместно с магистрами, убеждаемся, что для освоения инженерных дисциплин у них остается всего 1 полноценный семестр (второй обычно существенно сокращается по объему, ввиду необходимости подготовки бакалаврской диссертации). По этой причине выпускник-бакалавр оказывается инженером-недоучкой, который вряд ли заинтересует серьезных потребителей, и в лучшем случае найдет применение только в качестве вычислителя-пользователя ЭВМ или программиста. Поэтому гораздо более перспективным представляется возрождение в полном объеме выпуска полноценных инженеров с 5-летним сроком обучения, прослушавших на 4–5 курсах полный цикл инженерных дисциплин с практическими применениями к текущим потребностям российской промышленности и производства. Бакалаврский же уровень может остаться в качестве промежуточной ступени, необходимой для выпускников, которые намерены трудоустраиваться за рубежом.

Резюмируя сказанное, можно предложить модифицировать существующую 2-х уровневую систему в систему инженер – 5 лет обучения, магистр – 6 лет, сохранив 4-х летний бакалаврский уровень в качестве промежуточной квалификации с выдачей выпускнику соответствующего диплома в случае необходимости. Эта система позволит вернуть инженеру его высокую миссию – разработку конкурентоспособных изделий техники, отвечающих требованиям современного рынка. Что касается бакалавра, то его, по-видимому, ждёт более скромная роль – обеспечение компьютерного сопровождения текущих инженерных разработок и их презентация.

В заключение нужно отметить, что в последнее время проблеме возрождения и развития инженерного образования в России посвящён целый ряд публикаций в журналах [1, 2]. В них даются как качественные, так и

количественные оценки состояния дел в сфере технического образования и предлагаются возможные подходы к их улучшению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высшее образование сегодня. – 2012. №11. С.7-22.
2. Высшее образование в России. – 2013. №2. С.28-61.

УДК 372.854

Н.П.Танцура, Л.Н.Блинов, И.А.Соколов

ИННОВАЦИОННО-СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРЕПОДАВАНИЮ ХИМИИ В ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ



Надежда Петровна Танцура, к.х.н., доцент,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-6523, E-mail: natan533@mail.ru.



Лев Николаевич Блинов, д.х.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург



Иван Аристидович Соколов, д.х.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург

Аннотация

В работе рассмотрено обоснование необходимости перехода от традиционного подхода к преподаванию химии в техническом университете к инновационно-системному подходу, который в дальнейшем может способствовать внедрению модульно-компетентностной формы обучения. Определены задачи инновационно-системного подхода, сформулированы компетенции по химии по уровням, включая область знаний, умений и личностно-мотивационную область, приведены этапы структурирования дисциплины.

Ключевые слова: инновационно-системный подход, образовательный процесс, системные знания, системный подход, компетенции, модуль.

N.P.Tantsura, L.N.Blinov, I.A.Sokolov

INNOVATIVE-SYSTEMATIC APPROACH TO CHEMICAL EDUCATION IN TECHNICAL UNIVERSITIES

Dr. Nadezda P.Tantsura[1], Dr. prof. Lev N. Blinov[1], Dr. prof. Ivan A. Sokolov[1]
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The present work reviews the justification for the necessity of transition from the traditional approach to chemical education in technical universities to the innovative-systematic approach, which may further facilitate the adaptation of the modular-competence form of education. The purposes of the innovative-systematic approach are determined; chemical competences are formulated by levels, including the spheres of knowledge, skills and self-motivation; stages of the discipline structuring are given.

Key words: innovative-systematic approach, educational process, systematic knowledge, systematic approach, competences, module.

Современное информационное общество, основанное на знаниях и компетентности специалистов, сделало актуальной проблему инновационных подходов к организации образовательного процесса[1]. Динамичному и быстро меняющемуся миру необходимы специалисты, которые способны решать нестандартные проблемы в сфере профессиональной деятельности, что предполагает наличие умений и навыков анализировать процесс, явление или систему и принимать решения. Для достижения этих целей, сформулированных в основных образовательных программах (ООП) дисциплин на кафедре ОиНХ СПбГПУ начали внедрять инновационно-системный подход к образовательной деятельности [2] по дисциплине химия на младших курсах СПбГПУ Такой подход позволяет оптимизировать учебный процесс и обеспечить его наибольшую эффективность и результативность.

В начале этой работы были сформулированы задачи, которые мы ставим перед собой, применяя инновационно-системный подход:

- обеспечение комплексного изучения дисциплины, которое способствует формированию целостного представления о ней и позволяет студентам понимать тесную взаимосвязь ее разделов;
- создание условий для лучшего восприятия содержания дисциплины путем разработки оптимальных учебных программ и использования компьютерных технологий;
- повышение эффективности учебного процесса за счет активизации творческой деятельности, мотивационной сферы студентов и развития самостоятельного мышления[3,4];
- формирование у студентов системных знаний, что предусматривает рассмотрение предметов и явлений с точки зрения целостности и анализа их взаимосвязей.

Дисциплина химия на кафедре ОиНХ разделена на четыре уровня. Первым является «нулевой уровень», который предусматривает довузовскую подготовку будущих студентов и достижение ими уровня «входных знаний», требуемых в высшей школе. Три других уровня связаны с базо-

вым курсом химии (или общей химией), углубленным курсом химии (неорганическая химия), курсом прикладной химии и специальными главами химии для некоторых направлений бакалавриата. К сожалению, в последние годы для студентов многих институтов СПбГПУ нулевой уровень стал требовать серьезной корректировки, иначе не представляется возможным организовать эффективный и результативный учебный процесс. С этой проблемой сталкиваются не только химики, но и физики, и математики. Как показал анализ успеваемости студентов 1 курса, чаще всего трудности в учебном процессе возникают у студентов, имеющих суммарный балл ЕГЭ менее 180-185 (на русский язык приходится от 70 до 90 баллов). Вероятно, при наличии во многих институтах СПбГПУ такой проблемы необходима разработка общеуниверситетских подходов или методов корректировки нулевого уровня по дисциплинам естественно-научного цикла.

На младших курсах мы сталкиваемся еще с одной проблемой, которая осложняет учебный процесс и, в том числе, для решения которой требуется его модернизация. Этой проблемой в последние годы является неумение студентов самостоятельно работать с учебным материалом и усваивать его. Поэтому внедрение новых подходов и технологий в образовании должно также способствовать выполнению задачи, сформулированной давно крупным педагогом К.Ушинским, «учить учиться». Поскольку современные подходы в образовании требуют хорошего методического обеспечения дисциплин, существует необходимость в разработке методического пособия, которое будет способствовать развитию навыков и способов учиться, в недостаточной степени развиваемых в средней школе. Вероятно, такое пособие должно стать результатом коллективного труда преподавателей разных кафедр.

При изучении различных дисциплин в высшей школе ФГОС ВПО каждого направления формулирует компетенции - требования к подготовке выпускников или результатам освоения ООП. Компетенции в образовании включают знания, навыки и умения, которыми должен владеть специалист, в определенной области. В них также отражено личностное отношение человека к предмету деятельности.

С этой точки зрения мы сформулировали компетенции по химии, содержащие три компоненты, в развернутом виде по уровням:

1. Компонента в области знаний (должен знать) включает следующие последовательные уровни знаний:

- *знание-знакомство* (узнавание химических объектов, явлений, понятий при повторной встрече, нахождение в них различий, знание химической классификации и номенклатуры);
- *знание-копия* (самостоятельные репродуктивные действия над химическими знаниями с использованием имеющейся информации);
- *знание-продукция* (воспроизведение и понимание полученных химических знаний);

- высшим уровнем являются *системные знания,* связанные с формированием совокупного знания о процессах, объектах и явлениях окружающего мира в результате установления взаимосвязей между всеми компонентами знаний. Системные знания помогают принимать правильные решения в незнакомых и нестандартных ситуациях, имеющих, в частности, химическую природу. Например, при возникновении аварий с вредными веществами).

Компонента в области умений (должен уметь) содержит следующие последовательные уровни умений:

- *первичные умения* (уметь корректно выполнять предписанные действия по инструкциям, например, при работе в химической лаборатории, и другим нормативным документам в известных ситуациях);

- *репродуктивные умения* (уметь самостоятельно выполнять действия по решению типовых химических задач, требующих выбора из известных методов при предсказуемо изменяющейся ситуации);

- *продуктивные умения* (уметь самостоятельно выполнять действия, связанные с решением нестандартных задач, требующих выбора наиболее эффективного метода из известных и имеющих химическую природу). Например, принятие правильных решений при внезапном загрязнении помещения ртутью, взрыв в закрытом помещении сосуда с токсичным веществом и др.;

- *исследовательские умения* (уметь самостоятельно и творчески проводить простейшие исследовательские работы. Например, выполнение анализа природной воды, различных растворов и сплавов).

Компонента в личностно-мотивационной области компетенций включает следующие последовательные уровни для дисциплины химия, характеризующие отношение обучающегося к осуществляемой деятельности (владения ею):

- *безответственность* (безразличное, халатное отношение к учебе по химии, выполнению химических работ и заданий, правил техники безопасности);

- *ответственность* (позитивное отношение к учебной и трудовой деятельности, активность при выполнении полученных заданий);

- *инициативная ответственность* (проявление настойчивости, трудолюбия, творческого подхода, готовности самостоятельно выполнять полученные и дополнительные задания).

Таким образом компетенции по химии включают три компонеты: *знаниевую компоненту*, характеризующую химические знания обучающегося; *функциональную компоненту,* характеризующую умения действовать с химическим веществами, а также в ситуациях, связанных с химией; *личностно-мотивационную компоненту*, характеризующую отношение обучающегося к деятельности и поступкам, связанным с химией или имеющими к ней отношение. Учебный процесс должен быть ориентирован на наи-

более высокие уровни в каждой из компонент компетенций. Наш опыт показал, что оптимизация учебного процесса и систематический текущий контроль знаний каждого студента практически на каждом занятии делают учебный процесс более эффективным и существенно стимулируют самостоятельную работу.

Для эффективного достижения планируемых в ООП результатов по химии в рамках инновационно-системного подхода с целью максимальной оптимизации учебного процесса и повышения его эффективности большое внимание уделено структурированию изучаемой дисциплины, которое представлено в виде двух этапов:

1. *Выделение для данной дисциплины трех основных составляющих*:

– моделей химических объектов и систем (они связаны с направлением подготовки студентов);

– методов изучения и анализа химических объектов;

- *методов синтеза* незнакомых и новых химических объектов.

2. *Выделение* для каждой составляющей основных *базисных категорий*, например:

- *базисных законов и понятий*, составляющих «ядро» химических знаний;

- *базисных операций (действий)*, представляющих собой минимально необходимый набор действий при изучении химических систем;

- *базисных методов*, представляющих собой систематизированные алгоритмы базисных действий над исходными реагентами, промежуточными и конечными продуктами химических реакций и сопровождающими их энергетическими эффектами.

К базисным химическим законам и понятиям можно отнести: химическая система, вещество, основные законы химии, стадии организации вещества, реакционная способность веществ, химическая номенклатура. Строение атома, химическая связь, Периодическая система элементов, дисперсные системы, растворы, скорость реакции, химическое равновесие, кислотно-основные и окислительно-восстановительные свойства веществ.

К базисным операциям (действиям) в химии следует отнести: уравнения химических реакций, термохимические уравнения и расчеты, термодинамический анализ химических процессов, окислительно-восстановительные процессы и возможность их протекания, электронные паспорта атомов химических элементов, процессы коррозии, гидролиза, сдвиги химического равновесия.

Базисные методы в химии включают: химическая идентификация, качественный и количественный анализ, физико-химические методы анализа различных веществ, сплавов и химических систем.

Инновационный подход и компетенции по химии разрабатываются с учетом *основных принципов фундаментальности и системности обучения химии*:

- *цели, содержание и средства подготовки по химии* должны составлять единую систему. За этот счет достигаются педагогические цели химического образования, которые должны быть диагностируемыми и достаточными для обеспечения фундаментального образования. Материал «ядра» химических знаний должен быть также ориентирован на активное использование в общетехнических и специальных дисциплинах.

-*принцип непрерывности химического образования*, который обеспечивается за счет непрерывной подготовки по химии, начиная с курса общей химии до специальных разделов химии и специальных курсов выпускающих кафедр.

принцип опережающих знаний по химии, позволяющий использовать и развивать их в дальнейшем при рассмотрении новых приоритетных технологий, связанных с химией.

индивидуализация обучения по химии реализуется за счет разнообразных видов самостоятельной работы студентов и привлечения компьютерной техники, которая используется как техническое средство обучения. Организация на кафедре компьютерного класса позволит нам осуществлять контроль знаний студентов по химии, моделировать поведение различного рода химических систем или систем, имеющих химическую составляющую (например, экологических).

Проведенная работа позволит перейти к следующему этапу – постепенному внедрению модульно-компетентностной формы обучения [5,6], которую теоретики и практики педагогической науки считают наиболее эффективной и стимулирующей самостоятельную работу студентов, усиливающих их мотивационную деятельность. В этом случае результаты обучения формулируются в начале обучения и мотивируют обучающегося к их достижению, а не проявляются в том или ином виде по завершению обучения как в традиционной форме. Модульно-компетентностная форма обучения (МКФО) в применении к конкретной дисциплине предполагает ее деление на модули, т.е. завершенные единицы учебного материала, целевую программу действий и методическое руководство, обеспечивающее достижение поставленных целей. Овладение модулями сопровождается контролем и оценкой знаний, как со стороны обучающегося, так и со стороны преподавателя, который начисляет студенту определенное количество зачетных единиц. В рамках МКФО каждый студент может проводит собственную оценку качества усвоения отдельных блоков модуля в той или иной форме по бальной системе. Это позволит преподавателю своевременно и индивидуально корректировать работу студентов и осуществлять своевременную помощь (разные уровни домашних заданий, консультации, дополнительные учебные материалы, общение в интернете и т.д.). Это также может позволить рассредоточить в течение семестра контрольные мероприятия, стимулируя студентов к регулярной работе на протяжении всего периода обучения.

Модульно-компетентностная форма обучения требует разработки модулей, методических пособий и рекомендаций для студентов по модулям дисциплины, пособий с индивидуальными заданиями разного уровня сложности. Необходимо также формирование и внедрение рейтинговой или кредитной системы контроля знаний, навыков и умений студентов по освоению модулей. В связи с этим инновационно-системный подход к дисциплине можно рассматривать как первый шаг в направлении формирования модулей дисциплины химия и более эффективного достижения компетенций, сформулированных в ООП дисциплины [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 1.Подласый И.П. Педагогика. - М.: Изд-во «Владос». - 2007.- 456 с.
2. 2.Химия. Инновационно-системный подход: Учебн. пособие/ Блинов Л.Н.[и др.].- С-Пб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2012. – 95 с.
3. Ильин Е.П. Мотивация и мотивы. – С-Пб.: Изд-во «Питер». – 2011. – 462 с.
4. Ильин Е.П. Психология для педагогов. – С-Пб.: Изд-во «Питер». – 2012.- 565 с.
5. Бабенко Н.Л. Компетентностный подход как основа модернизации образовательных стандартов высшего образования.[Электронный ресурс]//:http://www.rspu.edu.ru/rspu/science/conferences/conference_ped/section_1/.
6. В.П.Медведев, Л.Н.Денисова.Модульно-компетентностныйподход к новым государственным образовательным стандартам // Фундаментальные исследования.- 2009.- №2.- с.93-96.
7. Разработка моделей программ, построенных на компетенциях / Олейникова О.Н [и др.].- М.: «Альфа-М», 2005.- 120 с.

УДК 514

А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников, Е.С. Писанка

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДИСЦИПЛИНЫ "НАЧЕРТАТЕЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ"



Андрей Аркадьевич Шоломицкий, д.т.н., профессор,
ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет",
ул. Артема, 58, Донецк, 83001, Украина
Тел.: +380 (62) 301-07-81. Эл. почта: sholomitskij@mail.r



Алексей Леонидович Сотников, к.т.н., доцент,
ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет",
ул. Артема, 58, Донецк, 83001, Украина
Тел.: +380 (62) 348-50-56. Эл. почта: m-lab@ukr.net



Елена Сергеевна Писанка,
ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет",
ул. Артема, 58, Донецк, 83001, Украина
Тел.: +380 (62) 338-48-85. Эл. почта: elena_pisanka@rambler.ru

Аннотация

В настоящее время наряду с построением трехмерных моделей промышленного оборудования и сооружений на основе теоретических данных проектно-конструкторской документации актуальным является построение тех же моделей на основе экспериментальных данных по результатам натурных измерений для решения различных задач совершенствования и оптимизации конструкции оборудования и сооружений.

Ключевые слова: геометрические размеры, трехмерные модели, экспериментальные данные, измерительный комплекс, линейная алгебра.

A.A. Sholomytskyi, A.L. Sotnikov, E.S. Pisanka

PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF THE DISCIPLINE "DESCRIPTIVE GEOMETRY"

Andrey A. Sholomytskyi[1], e-mail: sholomitskij@mail.ru
Alexey L. Sotnikov[1], e-mail: m-lab@ukr.net
Elena S. Pisanka[1], e-mail: elena_pisanka@rambler.ru
[1]Donetsk National Technical University, Ukraine

Abstract

Nowadays alongside with 3D-modeling of the industrial equipment and constructions on the basis of theoretical data of engineering design documentation it is of current interest to create the same models on the basis of experimental data on the results of in-situ measurements in order to solve various tasks of improvement and optimization of equipment and buildings construction.

Key words: geometrical dimensions, three-dimensional models, experimental data, measuring complex, linear algebra.

Во многих отраслях промышленности актуальной задачей является определение фактических геометрических размеров и форм различных производственных объектов (сооружений и оборудования). В числе этих задач определение точности изготовления деталей оборудования и возведения сооружений [1], оценки их технического состояния [2], выставки и центровки технологического оборудования [3…5], восстановления проектно-конструкторской документации [6] и т.д.

В настоящее время благодаря развитию электронно-вычислительных технологий появилось много различных аппаратно-программных средств, позволяющих с наперед заданной точностью решать данную задачу [6…8 и др.]. Это всевозможные координатно-измерительные манипуляторы, лазерные сканирующие системы различных видов, цифровые камеры и т.д.

Простейшим высокотехнологичным примером может служить трехкоординатный измерительный комплекс на базе высокоточного электронного тахеометра и персонального компьютера со специализированным управляющим программным обеспечением (ПО) – "Визир-3D" [7]. Разработка, промышленное опробование и внедрение в научные и учебные процессы данного комплекса осуществлено в Донецком национальном техническом университете (Украина).

Два основных устройства измерительного комплекса "Визир-3D" – измерительное устройство (тахеометр) и компьютер (рис. 1) взаимодействуют между собой, используя каналы радиосвязи по технологии Bluetooth. В измерительном комплексе реализована связь "клиент-сервер" по протоколу "point-to-point". Тахеометр получает от компьютера управляющие команды, а компьютер регистрирует выполненные тахеометром измерения и выполняет их обработку в режиме реального времени.

Использование данного режима работы и обработки результатов измерения позволяет очень оперативно, сразу после выполнения измерений, получить результаты о фактическом положении или фактической форме объекта. При этом измерительный комплекс имеет все возможности для построения, уравнивания и предрасчета точности плановых, высотных, а также планово-высотных геодезических сетей произвольной конфигурации и обработки результатов высокоточных инженерно-геодезических съемок.

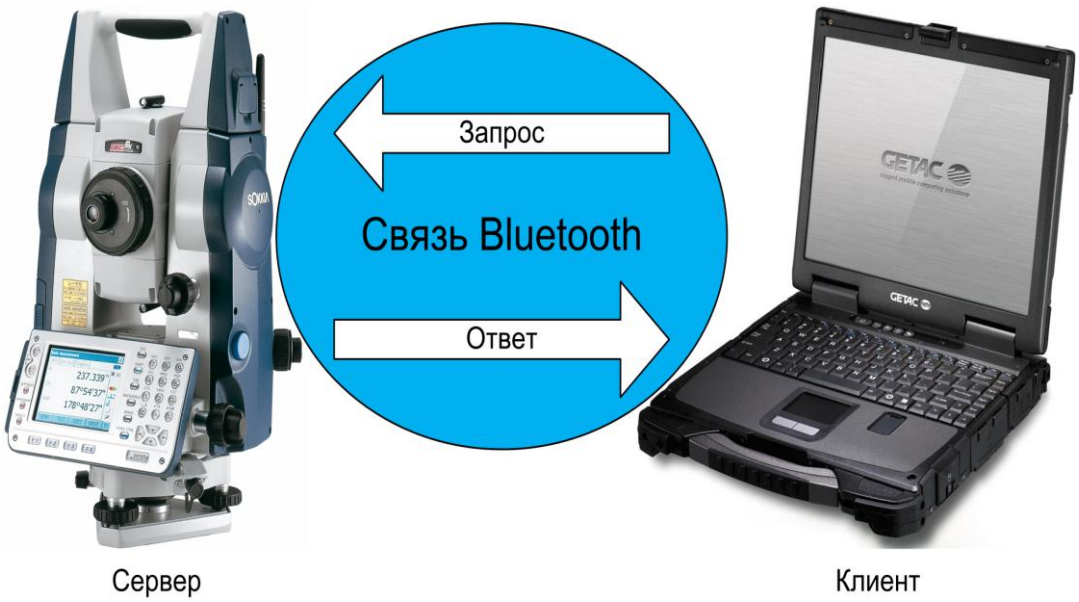


Рис. 1. Схема взаимодействия устройств
измерительного комплекса "Визир 3D"

В ПО измерительного комплекса "Визир 3D" результаты измерения геометрических размеров и формы конкретного объекта представляют собой "проект измерений", который может содержать произвольное число отдельных измерений различных частей объекта, в т.ч. и не связанных между собой. В проект измерений может быть добавлена теоретическая модель объекта (на основе проектно-конструкторской документации), в этом случае ПО может выполнять анализ соответствия фактического положения или фактической формы объекта его проектным значениям.

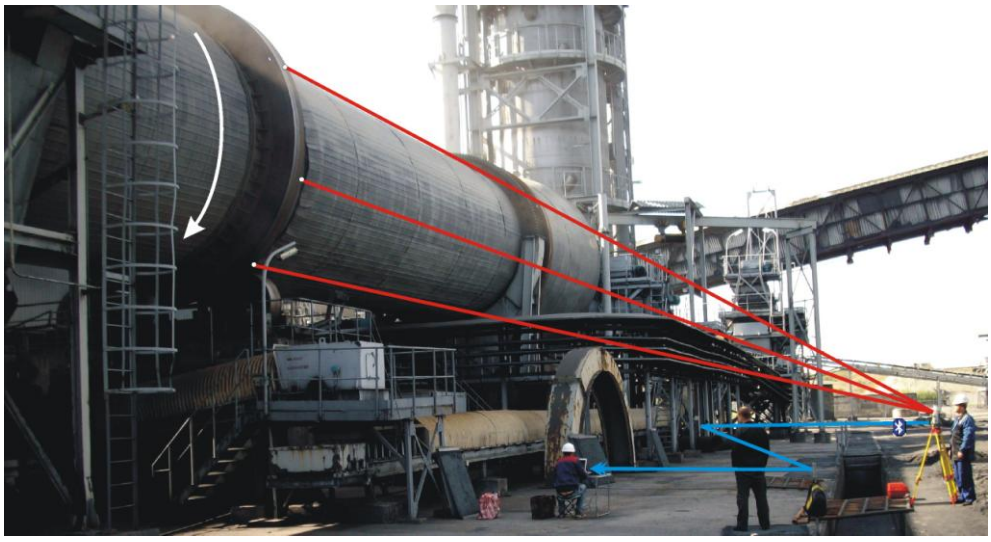


Рис. 2. Измерение геометрических параметров сушильного барабана

Порядок работы с измерительным комплексом "Визир 3D" заключается в установке тахеометра в произвольную точку и привязку к высокоточной геодезической сети объекта. Дальнейшее управление процессом измерения и последующий анализ результатов измерения осуществляется в ПО комплекса (рис. 2).

Результаты измерения с помощью измерительного комплекса "Визир-3D" служат основой для построения трехмерных моделей объектов фактической формы (рис. 3 и 4). Данные модели затем можно с помощью программных методов "импорта-экспорта" перевести в формат различных систем автоматизированного проектирования или трехмерного моделирования для решения последующих задач совершенствования и оптимизации конструкции объекта (оборудования и сооружений).

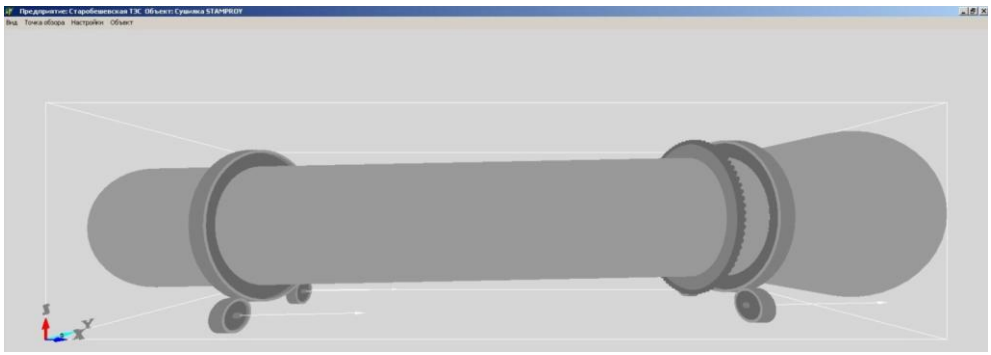


Рис. 3. Трехмерная модель сушильного барабана [4]

В период с 2006 по 2013 гг. с применением измерительного комплекса "Визир-3D" были решены различные производственные задачи на промышленных предприятиях Украины [1…6 и др.], подтверждая его эффективность.

Таким образом, в арсенале современного инженера появляются инструменты, которые позволяют создавать трехмерные модели различных производственных объектов не только по теоретическим данным, на основе проектно-конструкторской документации, но и по фактическим сведениям о реальных их размерах и формах. При этом в учебном процессе на машиностроительных и строительных специальностях практически не предусмотрено дисциплин, дающих теоретические сведения и практические навыки применения аналогичных аппаратно-программных средств в производственной деятельности современных инженеров.

Сегодня принято считать, что дисциплина "Начертательная геометрия" не имеет практической ценности в силу развития вычислительной техники и аппарата линейной алгебры, но незаменима как составляющая общего инженерного образования на машиностроительных и строительных специальностях [9]. В связи с чем, содержание дисциплины практиче-

ски не пересматривалось последние десятилетия не только в Украине, но и в др. странах СНГ [10].

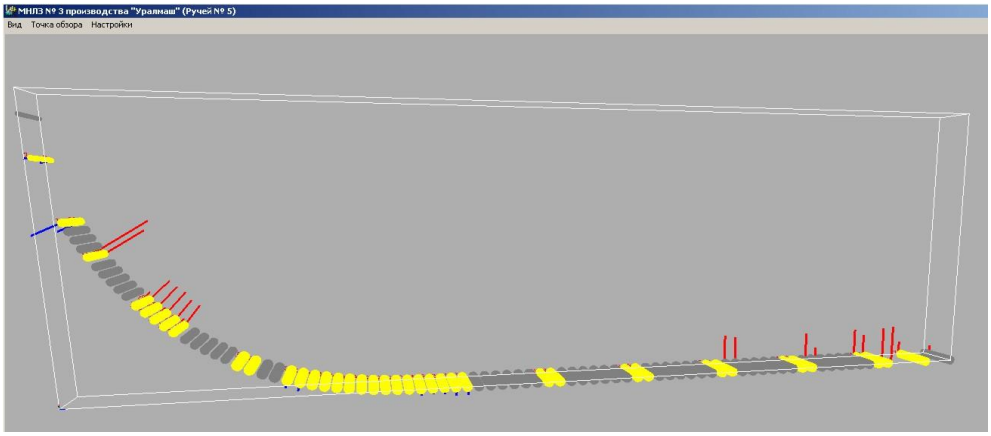


Рис. 4. Трехмерная модель роликовой проводки
машины непрерывного литья заготовок [3,5]

Учитывая, что именно применение вычислительной техники и аппарата линейной алгебры лежит в основе координатно-измерительных манипуляторов и лазерных сканирующих систем различных видов, решающих такие важные задачи, как определение фактических геометрических размеров и форм различных объектов, авторы считают целесообразным и перспективным развитие дисциплины "Начертательная геометрия" именно в этом направлении. В рамках дисциплины должны появиться разделы, посвященные изучению конструкции и функциональных возможностей соответствующих аппаратно-программных средств, способов построения трехмерных моделей объектов по фактическим данным и методов анализа результатов измерений.

При этом способы построения трехмерных моделей объектов должны предусматривать неполноту исходных данных в силу невозможности их определения при натурных измерениях из-за ограниченной видимости некоторых частей объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Могильный С.Г. Шоломицкий А.А. Высокоточные геодезические работы при строительстве, монтаже и мониторинге состояния объектов / Нові технології в будівництві. – 2011. – №2(22). – С. 42-52.
2. Наблюдения за деформациями, оценка и прогнозирование технического состояния подъемно-транспортного оборудования / Шоломицкий А.А., Сотников А.Л., Нагорный В.М. и др. // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №3. – С. 31-38.

3. Могильный С.Г., Шоломицкий А.А., Сотников А.Л. Геодезические работы при проверке соосности оборудования машины непрерывного литья заготовок / Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №2. – С. 19-27.
4. Шоломицкий А.А., Сотников А.Л., Адаменко В.И. Контроль геометрических параметров машины непрерывного литья заготовок / Металлургические процессы и оборудование. – 2007. – №3. – С. 27-30.
5. Геодезическое обеспечение высокоточного монтажа и выверки технологического оборудования / Могильный С.Г., Шоломицкий А.А., Сотников А.Л. // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2011. – №2. – С. 34-45.
6. Могильный С.Г., Шоломицкий А.А., Лунев А.А. Комбинированный метод съемок архитектурных объектов / Наукові праці ДонНТУ. Серія "Гірничо-геологічна". – 2010. – Вип.11(161). – С. 88-95.
7. Прямицин И.Б., Челпанов И.Б. Лазерные сканирующие устройства. Методы и методики исследования характеристик. Области применения / Современное машиностроение. Наука и образование. – 2012. – №2. – С. 631-644.
8. Могильный С.Г., Шоломицкий А.А., Шморгун Е.И. Трьохкоординатний вимірювальний комплекс "Визир 3D" / Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2009. – Вип.9(143). – С. 13-25.
9. Начертательная геометрия – Википедия. Режим доступа – http://ru.wikipedia.org/wiki/Начертательная_геометрия.
10. Волошинов Д.В. Начертательная геометрия. Есть ли у нее будущее в ВУЗе? // Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом ВУЗе в условиях ФГОС ВПО: Материалы II международной научно-практической Интернет-конференции. Февраль-март 2011 г. Режим доступа – http://dgng.pstu.ru/conf2011/papers/38.

УДК 7.021.23

О.Г. Ярусова, Н.А. Долгая, М.Ю. Ватолин

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ МАКЕТА ДЛЯ УЧЕБНЫХ МАСТЕРСКИХ НА ПРИМЕРЕ УНИВЕРСИТЕТА ПРИКЛАДНЫХ НАУК ГОРОДА АУГСБУРГ (ГЕРМАНИЯ)



Нина Александровна Долгая, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7514, E-mail: nina_2000@rambler.ru.



Ольга Геннадьевна Ярусова, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7514, E-mail: petru440-2.11@mail.ru



Михаил Юрьевич Ватолин, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7514, E-mail: kpgd@spbstu.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы выбора метода макетирования в процессе дизайн-проектирования, в том числе в процессе обучения дизайнеров. Был проведён анализ существующих методов, выявлены их достоинства и недостатки. Сделаны выводы о целесообразности использования технологии быстрого прототипирования в условиях учебных макетных мастерских на основе применения данной технологии в Университете прикладных наук города Аугсбург. Обзор показал, что использование технологи быстрого прототипирования предоставляет широкие возможности в учебном макетировании, но существенным недостатком является дороговизна использования технологии. Таким образом, применение данной технологии в данном случае целесообразно, только если имеются соответствующие финансовые возможности.

Ключевые слова: макетирование, дизайн-проектирование, быстрое прототипирование, геометрическое моделирование.

O.G. Yarusova, N. A. Dolgaya, M.U. Vatolin

THE APPLICATION OF RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGY DURING MODEL CREATION FOR TEACHING WORKSHOPS ON A BASIS OF UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, AUGSBURG, GERMANY

Nina A. Dolgaya[1], e-mail: nina_2000@rambler.ru
Olga G. Yarusova[1], e-mail: petru440-2.11@mail.ru
Mihail U. Vatolin[1], e-mail: kpgd@spbstu.ru
[1] St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article is devoted to the selection of prototyping method in design process as well as in learning of designers. The provided analysis of existent methods showed their strengths and weaknesses. There are outcomes about feasibility of rapid prototyping in teaching workshops conditions on basis of Augsburg University of Applied Sciences. The review has shown that usage of rapid prototyping gives wide possibilities in teaching process, but the major disadvantage of this technology is the relatively high total cost of ownership. Consequently, the technology can be applied only in case of sufficient budget.

Key words: design, prototyping, rapid prototyping, geometry modeling.

Макетирование и прототипирование являются важными этапами, как в создании инженерных проектов, так и в дизайн-проектировании. Этот факт необходимо учитывать и при реальном проектировании, и при обучении специалистов, занимающихся данными видами проектирования. Особенно это важно для дизайн-проектирования, как для сложного комплексного процесса, чаще всего объединяющего функциональную и эстетическую составляющую.

В процессе обучения специалистов дизайнеров следует учитывать, что существуют различные техники макетирования, и выбор метода макетирования и прототипирования должен производиться, с учетом специфики и возможностей конкретного учебного заведения [1].

Можно произвести условное деление видов макетирования на три основных общих категории: ручное макетирование, выполняемое с помощью простейшего ручного инструмента, станочное изготовление с применением различных станков, которые в свою очередь можно разделить на обычные и станки с ЧПУ. Третьим методом является применение технологий быстрого прототипирования (БП) [2].

У каждого метода есть свои достоинства и недостатки, поэтому в зависимости от условий и задач все они имеют право на существование, а также могут применяться в различных комбинациях. Ручные методы макетирования просты, недороги и не требуют сложного оборудования, но они достаточно трудоёмки, требуют много времени и иногда не безопасны для здоровья. Станочные методы позволяют упростить процесс изготовления, сократить время необходимое на него, требуют специального оборудования и навыков работы на нём. Технологии БП представляют широкие возможности в создании макета на основе компьютерной модели, но установки и материалы для их производства довольно дороги, требуют навыков работы на них, знания процесса, специального обслуживания. Также модели, полученные на них, не всегда обладают достаточной прочностью, особенно при создании функциональных моделей [3].

Первые два метода в той или иной степени можно встретить в отечественных учебных заведениях [4]. Третий же способ встречается довольно редко и, в основном, в зарубежных институтах. Тем не менее, он достаточно интересен благодаря тем возможностям, которые он предоставляет.

Рассмотрим применение технологии БП в макетировании для учебных мастерских на примере Университета прикладных наук города Аугсбург (Германия).

Университета прикладных наук города Аугсбург – крупнейший университет в Баварской Швабии. В нём обучается около 5 000 студентов по различным научным направлениям, а также в области технологий и искусства, преподавательский состав насчитывает свыше 260 наставников, около 140 профессоров и более 240 человек вспомогательного персонала. В университете используются новейшие методики обучения и оборудование, созданы отличные условия для учебной и исследовательской работы, имеются хорошо оснащённые классы, лектории, лаборатории. Как современное учебное заведение университет делает ставки на инновации, творческий подход и прогресс. В университете насчитывается семь факультетов, среди которых Факультет дизайна, Факультет машиностроения и технологического оборудования, Архитектурный факультет и другие [5].

В состав Факультета машиностроения и технологического оборудования входит Лаборатория быстрого прототипирования. Факультет постоянно развивается, поэтому в 2011 году возможности лаборатории значительно расширились, появился 3D-сканер компании «Dimensionprinting» для быстрого проектирования, который используется в разработке научных исследований. Прототипирование используется, в основном, для реализации краткосрочных проектов факультета машиностроения и технологического оборудования. Лаборатория осуществляет услуги для всех факультетов.

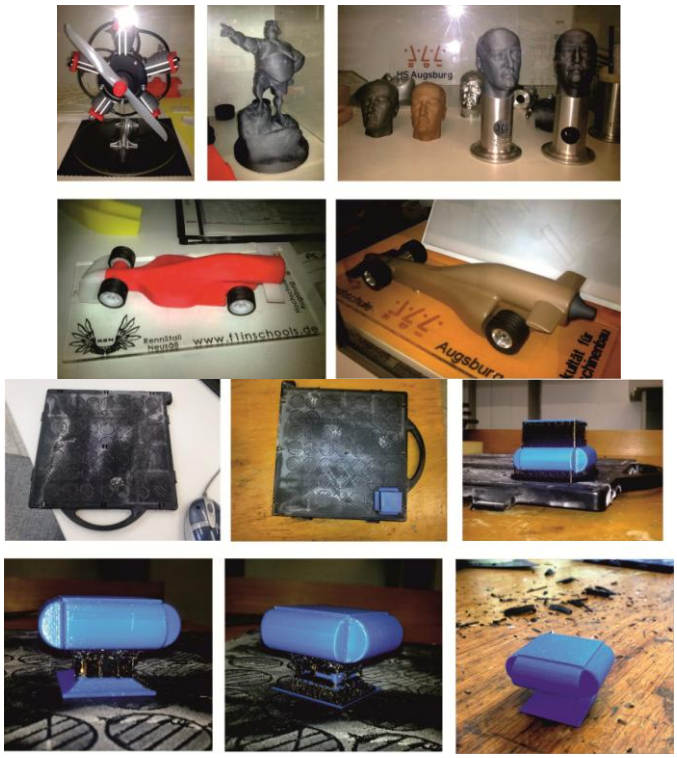


Рис. 1. Примеры изготовленных проектов

Обычно используется несколько технологий БП. Среди них: стереолитография (STL — «sterolithography»); отверждение на твёрдом основании (SGC — «Solid Ground Curing»); нанесение термопластов (FDM — «Fused Deposition Modeling»); распыление термопластов (BPM — «Ballistic Particle Manufacturing»); лазерное спекание порошков (SLS — «Selective Laser Sintering»); моделирование при помощи склейки (LOM — «Laminated Object Modeling») [6].

Все перечисленные технологии предполагают наличие трёхмерной компьютерной модели детали. Большинство известных САПР обеспечивают экспорт моделей в стандартном для БП формате STL формат [7]. Некоторые из установок БП называют трёхмерными принтерами [8].

В лаборатории БП используется 3D принтер «Dimension Elite» компании «Dimensionprinting». 3D принтер «Dimension Elite» работает с уникальным материалом «ABSplus» и позволяет выращивать прочные детали. Работа деталей в качестве защелок, рассверливание отверстий, стяжка винтами, склейка, податливость шлифовке – лишь некоторые из многочисленных достоинств данной технологии. Достаточно нажать лишь одну кнопку “print” (печать) и виртуальный прототип за считанные часы станет функциональным изделием. При помощи программного обеспечения «Catalyst® EX» в камере построения автоматически ориентируется STL файл, разбивается на слои, рассчитывается необходимая структура поддержки, специально генерируется файл движения печатающей головки в соответствии с геометрией модели, и отправляется на принтер. Для максимальной эффек-

тивности работы в камере построения принтера можно размещать одновременно несколько моделей. Поскольку принтер работает без помощи оператора, то в это время можно спокойно можете заниматься другими делами до полного изготовления детали.



Рис. 2. Установка быстрого прототипирования.

В результате использования 3D принтера, получаем меньше изменений, вносимых в разработку будущего изделия, более качественная конструкция продукта, более низкая стоимость производственных расходов, и более короткое время выхода конечного изделия на рынок.



Рис. 3. Макет модульной детской мебели, выполненный в лаборатории быстрого прототипирования

Оборудование и материалы стоят дорого, но метод БП удобно использовать в создании макетов для промышленных изделий, т.к. он значитель-

но снижает затраты и время производства, а также исключает ошибки и неточности получаемые в результате создания макетов руками.

Таким образом, говоря о целесообразности использования технологии быстрого прототипирования в учебном макетировании, можно сделать выводы о том, что единственным существенным недостатком метода является его дороговизна, поэтому его применение возможно при соответствующих финансовых возможностях учебного заведения. Если для конкретного учебного заведения дороговизна оборудования, материалов и создание необходимых условий для эксплуатации, в том числе наличие квалифицированного персонала для работы и обслуживания, не является проблемой, то использование технологии БП будет целесообразным и предоставит широкие возможности в области макетирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

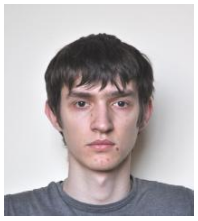
1. Долгая Н.А., Волошинов Д.В. Выбор технологий макетирования для учебных макетных мастерских // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч.III. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. С. 64-65.
2. Волошинов Д.В., Долгая Н.А, Кульчицкий А.А. Автоматизация технологий макетирования для учебных мастерских // Актуальные проблемы управления информационными системами: сб. тр. II Всероссийской науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы управления техническими информационными, социально-экономическими и транспортными системами» 13-15 ноября 2007 г. Санкт-Петербург / под общ. ред. Н.В. Афанасьевой – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. С. 40-43.
3. Долгая Н.А., Карев М.Б. Использование новых подходов в преподавании курса макетирования студентам, изучающим промышленный дизайн // Машиностроение в условиях инновационного развития экономики: сборник тезисов и докладов научно-методической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 112-116
4. Новиков Н. В. Макетирование в академическом дизайне, - СПб, 1998. – 77с.
5. Studying in Augsburg [Электронный ресурс] / University of Applied Sciences Augsburg – URL: http://www.hs-augsburg.de/en/index.html (дата обращения: 20.08.2007)
6. Зорин, С.Ф. Обзор технологий быстрого прототипирования [Электронный ресурс] / С.Ф.Зорин // Espotec – URL: http://www.espotec.ru/art_prot.htm (дата обращения: 20.03.2013)
7. Jesse Russell. Rapid prototyping. – VSD, 2012, 98 p.
8. Brian Evans. Practical 3D Printers. The Science and Art of 3D Printing. – APRESS, 2012. 301p.

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 621.5

А.А.Блажнов, В.Ю.Клюкин

ОБОСНОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ВАКУУМНОГО ВИХРЕВОГО БЕСКОНТАКТНОГО ЗАХВАТА



Александр Андреевич Блажнов, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)555-42-58, E-mail: aablazhnov@gmail.com



Валерий Юрьевич Клюкин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552 -66-23, E-mail: mmfdec@stu.neva.ru.

Аннотация

В работе дается обоснование конечно-элементной модели вакуумного вихревого бесконтактного захвата.

Исследована сеточная зависимость на примере задачи с соплом. Проведён подбор и расчёт параметров разбиения модели на конечные элементы. Выбрана модель турбулентности и заданы её параметры. Рассчитаны граничные условия, входные параметры турбулентности, полная температура.

Оценены значения ошибок при различных параметрах разбиения на конечные элементы

Ключевые слова: вихревой вакуумный захват, метод конечных элементов, сопло, сеточная зависимость.

A.A.Blazhnov, V.Yu.Klyukin

SUBSTANTIATION OF CERTAINLY-ELEMENT MODEL OF VACUUM VORTICAL CONTACTLESS CAPTURE

Alexander A. Blazhnov[1], e-mail: aablazhnov@gmail.com;
Dr. Valery Yu. Klyukin[1], E-mail: mmfdec@stu.neva.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

In work the substantiation of certainly-element model of vacuum vortical contactless capture is given.

Net dependence on an example of a problem with a nozzle is investigated. Selection and calculation of parameters of splitting of model on final elements is

spent. The model of turbulence is chosen and its parameters are set. Boundary conditions, the turbulence input parameters, full temperature are calculated.

Values of errors are estimated at various parameters of splitting into final elements

Key words: vortical vacuum capture, a method of final elements, a nozzle, net dependence.

Промышленные роботы являются важными составными частями современного промышленного производства. Одним из важнейших элементов промышленных роботов, определяющих их функциональные возможности, являются схваты.

Схваты предназначены для захвата, удержания изделия и перемещения его при выполнении технологических операций.

Конструируя схваты промышленных роботов, приходится учитывать конкретный тип детали или группы деталей, их форму, материалы и условия технологического процесса.

Интересной разновидностью вакуумных схватов являются бесконтактные схваты. Исследованию одного вида из таких схватов, а именно вихревых (циклонных) схватов на основе эффекта Ранке, и посвящена данная работа.

Схема вихревого схвата приведена в [2].

Принцип действия вихревого схвата основан на эффектах, возникающих в вихрях. При закрученном движении воздуха за счёт действия центробежных сил в центре камере возникает область с пониженным давлением.

В рассматриваемой конструкции вихревое движение в вакуумной камере создается при помощи четырёх сопел установленных таким образом, чтобы направление потока сжатого газа проходило по касательной к образующей камеры.

Исследование проводятся в виде численного эксперимента с использованием современного вычислительного программного комплекса созданного компанией ANSYS (пакет программ Fluent).

Результаты расчетов и их длительность, во-многом, зависят от разбиения расчетной модели схвата на элементы. Для начала на отдельных конструктивных элементах схвата определим сеточную зависимость, т.е. зависимость результатов численного эксперимента от разбиения расчетной модели на элементы. Для выявления сеточной зависимости необходимо сравнить результаты расчета при различном разбиении модели.

Это необходимо для того, чтобы определить какое первоначальное разрешение задать для разбиения расчетной модели схвата на элементы.

Первоначально рассмотрим модель сопла, представленную на рис. 1.

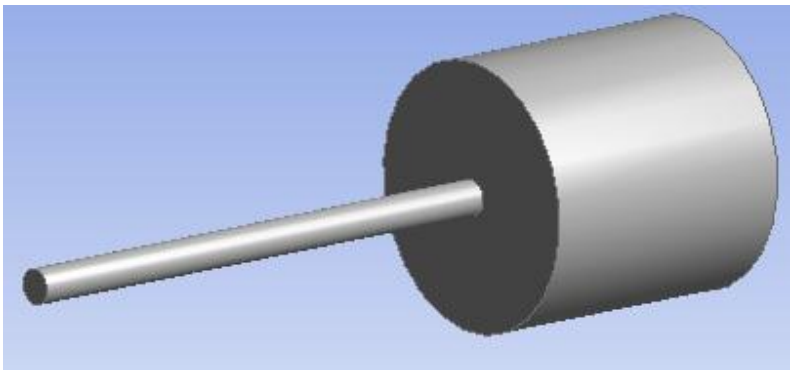


Рис. 1. Модель сопла

Она представляет собой два состыкованных цилиндра – тонкий цилиндр (сопло) с внутренним диаметром 2мм и цилиндр большего диаметра (внутренний диаметр). Воздух под давлением проходит через сопло и поступает внутрь цилиндра большого диаметра (выходная область).

Оценим длину грани конечного элемента сопла в пределах 0,1…0,5 мм. Для элементов выходной области установим те же параметры в пределах 0,5… 1мм. Меняем указанные параметры и оцениваем трудоемкость расчетов и их точность. Вид конечно-элементной модели представлен на рис. 2.

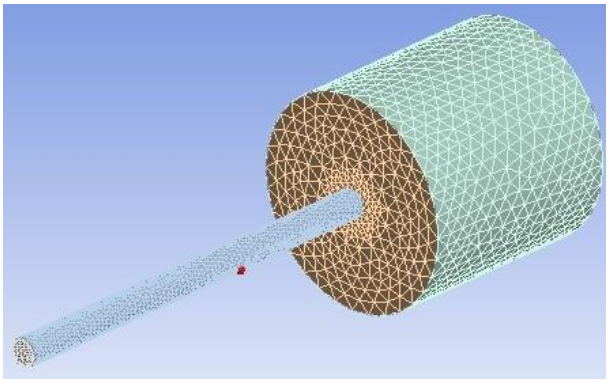


Рис. 2. Разбиение модели сопла на элементы

Так же вдоль стенки сопла сформируем слой элементов в форме призм с размером грани 0,15мм (рис. 3). Эти элементы необходимы для корректного формирования пограничного слоя. В этом слое быстро меняются расчетные параметры. Поэтому целесообразно «сгустить» сетку к границам расчетной области. Также для повышения корректности расчетов используем специальные пристенные функции.

В результате разбиения получили модель, состоящую из 70000 элементов. Время расчета 800 итераций составило 55мин.

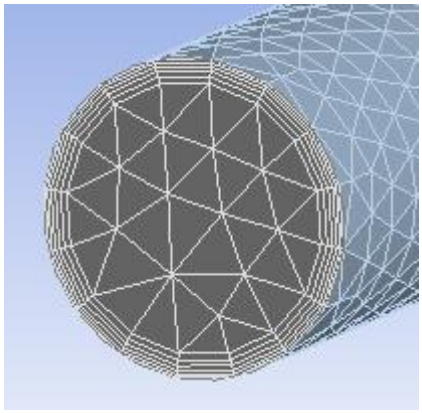


Рис. 3. Пристенная область сопла

При формировании граничных условий на входе сопла 1 (рис.4) было установлено избыточное давление равное 6 барам (pressure inlet). На границах выходной области (зона 2) статическое давление принято равным нулю (pressure outlet).

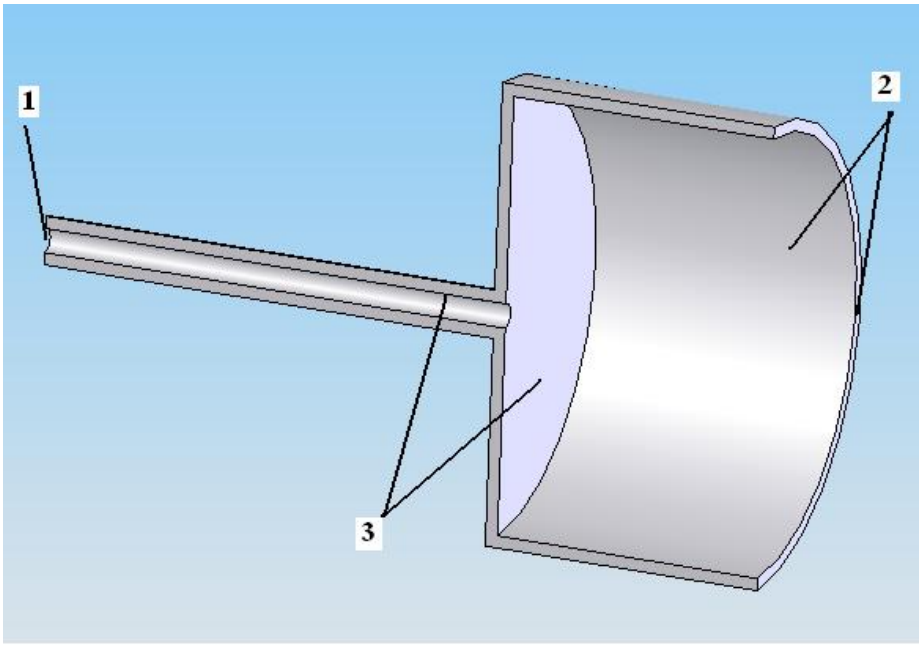


Рис. 4. Граничные поверхности

Остальным поверхностям присвоено граничное условие «стена» (wall).

В качестве модели турбулентности при проведении численного эксперимента была выбрана k − ε модель[1]. Наряду с уравнениями Навье-Стокса при использовании данной модели решается два дополнительных уравнения для изменения кинетической энергии турбулентности и диссипации турбулентности. Это наиболее часто используемая модель при решении реальных инженерных задач с большими числами Рейнольдса.

$$\mathrm{Re} = \frac{d_{сопла} \cdot \upsilon}{\nu} = \frac{0,002 \cdot 200}{1,3 \cdot 10^{-5}} \approx 30000,$$

где $d_{сопла}$ - характерный размер проходного сечения, υ - скорость (как первое приближение значение скорости принято равным 200 м/с – дозвуковая скорость) и ν - вязкость воздуха при нормальных условиях.

Режим течения рабочего тела явно турбулентный.

Т.к. рассчитывается закрученное течение, то выберем RNG версию k-ε модели. Она предложена Якхотом и Орзагом [1]. Уравнения для характеристик турбулентности и выражения для вихревой вязкости берутся такими же, как для стандартной k – ε модели, однако модельная константа $C_{\varepsilon 2}$ определяется как функция.

Берутся следующие стандартные константы замыкания модели:

$$C_\mu = 0,085; \quad C_{\varepsilon 1} = 1,42; \quad \tilde{C}_{\varepsilon 2} = 1,68; \quad \sigma_k = 0,72$$

$$\beta = 0,012; \quad \lambda_0 = 4,38$$

Расчёт ведется для сжимаемого газа с параметрами плотности и вязкости как у воздуха. Выполнено 800 итераций.

Во втором варианте разбиения на конечные элементы увеличим число элементов на 30% и доведём их до 100000 (рис. 5). И повторяем расчет.

В третьем варианте изменяем коэффициенты масштабирования, так чтобы число элементов увеличилось. В результате разбиения модели получили количество элементов равное 140000.

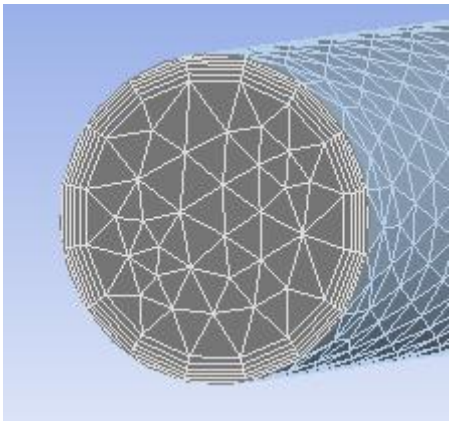


Рис. 5. Разбиение сопла на конечные элементы

При выполнении 800 итераций время расчета для второго варианта разбиения составило 92 мин, а для третьего – 117мин.

Для выявления сеточной зависимости произведено сравнение результатов расчета трех вариантов разбиения модели. Для сравнения выберем следующие оценочные параметры:

1. Профиль скорости в выходном сечении сопла.

2. Профиль изменения статического давления по длине сопла вдоль оси.

На рис. 6 представлены поля статического давления для первого и третьего разбиений p_1 и p_3 соответственно.

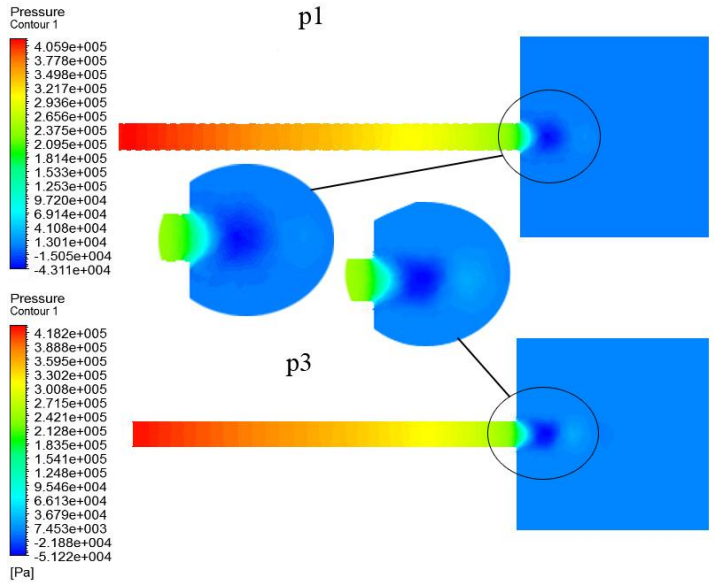


Рис. 6. Поля статического давления для разбиений p_1 и p_3

На рис. 7 также представлены поля скоростей для первого и третьего варианта разбиений p_1 и p_3 соответственно.

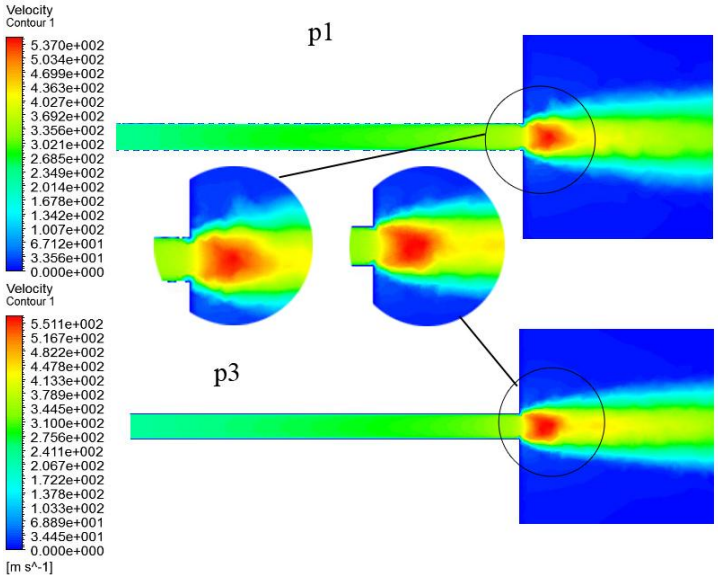


Рис. 7. Поля скоростей для разбиений p_1 и p_3

На рис. 8 представлен график изменения давления по длине сопла построенный для трёх разбиений p_1, p_2 и p_3.

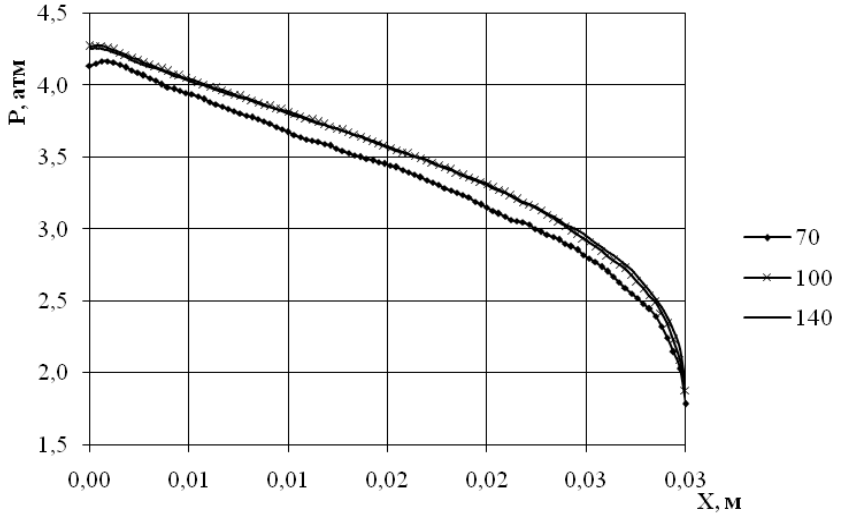


Рис. 8. Графики изменения статического давления по длине сопла

Величина ошибки при расчете статического давления не превышает 5,2% (рис. 9) для первого и второго вариантов, а при сравнении второго и третьего вариантов ошибка, в основном, менее 1%.

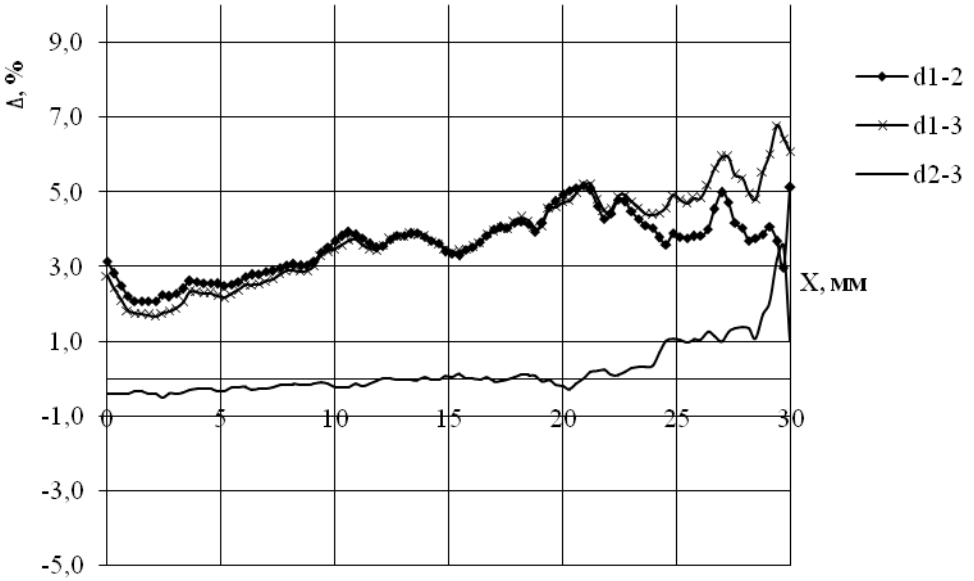


Рис. 9. Графики относительных ошибок

На рис. 10 представлены профили скоростей в поперечном сечении сопла для разбиения p_1, p_2 и p_3.

Значение ошибки расчета скорости при сравнении первого и второго вариантов разбиения не превышает 2,3% (рис. 11).

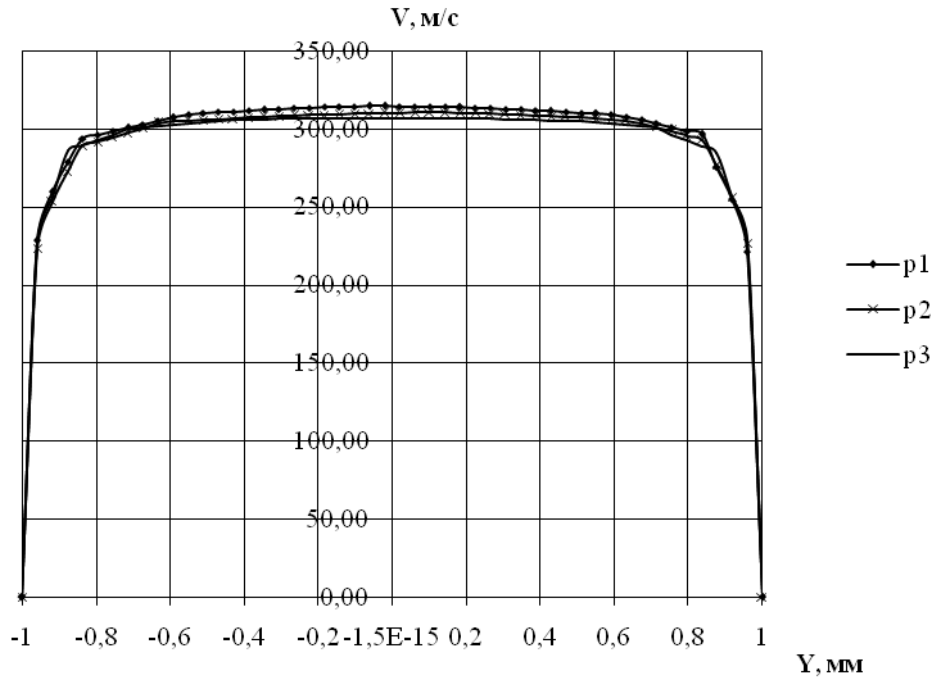


Рис. 10. Профиль скоростей для разбиения p_1 и p_2

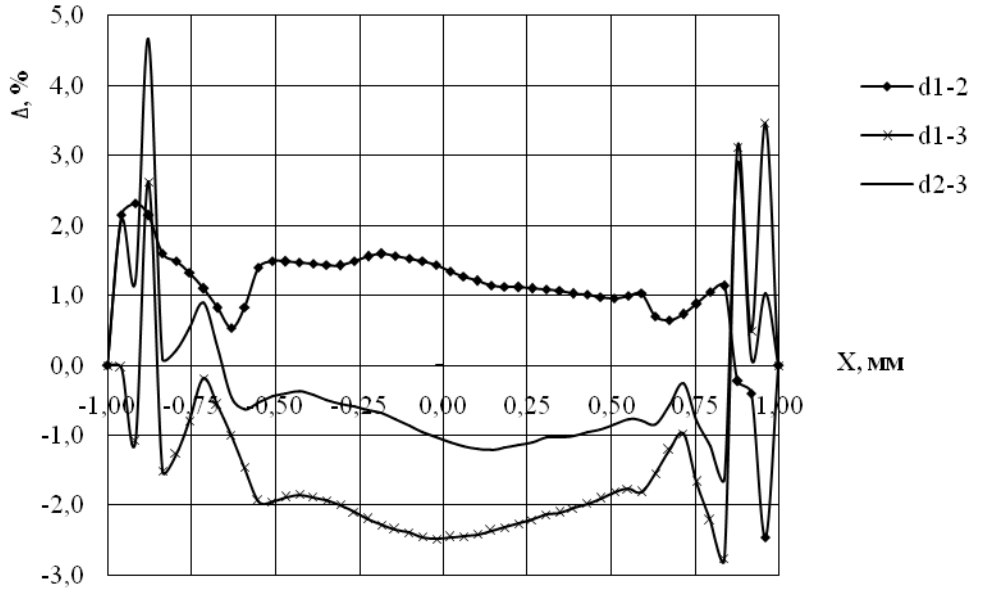


Рис. 11. Ошибки расчёта профиля скорости

При сравнении второго и третьего вариантов ошибка в основном не превышает 1,5%. Увеличение ошибки в пристенных областях объясняется наличием пограничного слоя с большими градиентами скоростей. Для точного расчета профиля скорости, сетка в этой области должна быть сгу-

щёна. Для решаемой задачи профиль скорости не так важен, а на интегральные значения скорости и давления прием сгущения сетки не даст повышения точности более 5%.

Но при увеличении числа элементов неизбежно растет время вычислений даже для этой задачи, по сути, сводимой к плоской, при увеличении числа элементов в два раза время расчетов тоже увеличилось вдвое.

Данное исследование позволяет сделать вывод, что сеточная зависимость в данной задачи не превышает 7%. Это удовлетворительно для данного класса инженерной задачи. Также надо учитывать ограничение, накладываемое используемым для расчета оборудованием, так компьютер с 2Гб памяти не позволяет вычислять модели с числом элементов более 0,5 миллиона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А.Белов, С.А.Исаев. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 108с.
2. А.А.Блажнов, В.Ю.Клюкин. Вихревой бесконтактный захват на основе эффекта Ранка. // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. / Под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.-с.166-176.
3. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Москва, 1969. – 185с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука,1974. – 712с.
5. В.Ю. Клюкин В.С. Харитонов. Пневмогидропривод и автоматика. Часть 1: Электропневматические приводы и системы автоматизации: уч. пособие.- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 177 с.

УДК 681.5.013

А.Н.Волков, В.А. Дьяченко, А.П. Петкова, В.Е. Брунман, Ю.В. Гичев.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАХВАТА И НАМОТКИ НА БОБИНУ ТОНКОЙ АМОРФНОЙ ЛЕНТЫ ПРИ ЕЕ ВЫХОДЕ ИЗ ЛИТЕЙНОГО КОМПЛЕКСА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ



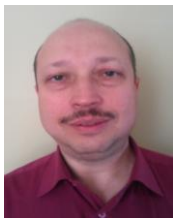
Андрей Николаевич Волков, д.т.н.
Санкт – Петербургский государственный Политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт – Петербург, 195251, Россия.
Тел. (812)552-96-86, E-mail: automats@inbox.ru



Владимир Алексеевич Дьяченко, д.т.н.
Санкт – Петербургский государственный Политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт – Петербург, 195251, Россия.
Тел. (812)552-96-86, E-mail: automats@inbox.ru



Ани Петрова Петкова, д.т.н.
Санкт – Петербургский государственный Политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт – Петербург, 195251, Россия.
Тел. (812)552-75-37, E-mail: apetkova@inbox.ru



Владимир Евгеньевич Брунман, к.э.н.
Санкт – Петербургский государственный Политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт – Петербург, 195251, Россия.
E-mail: brunman@yandex.ru



Юрий Васильевич Гичев, аспирант кафедры «Автоматы»
Санкт – Петербургский государственный Политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт – Петербург, 195251, Россия.
Тел. (812)552-76-55, E-mail: gichev-y@yandex.ru

Аннотация

Обсуждаются научно-технические проблемы автоматизации завершающей операции производства тонкой стальной аморфной ленты –

ее захват на больших скоростях и намотка с минимальной деформацией на бобину, а также возможные пути их решения.

Ключевые слова: аморфная лента, особенности производства, проблемы захвата и намотки ленты, предложение по автоматизации.

SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROBLEMS CONCERING AMORPHOUS RIBBON GRIPPING AND WINDING ON A REEL DOWNSTREAM OF THE CASTING SYSTEM AND WAYS OF THEIR SOLUTION

Andrey N. Volkov[1], e-mail: automats@inbox.ru;
Vladimir A. Dyachenko[1], e-mail: automats@inbox.ru;
Any P. Petkova[1], e-mail: apetkova@inbox.ru;
Vladimir E. Brunman[1], e-mail: brunman@yandex.ru;
Yuriy V. Gichev[1], e-mail: gichev-y@yandex.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia.

Abstract

Are discussed scientific and technical problems of the final operation of production a thin steel amorphous ribbon - its grip at high speed and with minimal deformation and winding of on a reel and possible ways of their solutions.

Key words: Amorphous ribbon, features of production, problems of gripping and winding ribbon, a proposal for automation.

По мере развития энергосберегающих технологий растет использование в промышленности тонкой стальной аморфной ленты. По опубликованным недавно сведениям в США производится такой ленты 132 тыс. тонн в год, в Японии - 52, в Китае - 40, в Индии - 45, в России – 0,5 тыс. тонн. Производство такой ленты осуществляется на специальных литейных комплексах, в которых аморфная лента формируется из расплава на быстро вращающемся охлаждаемом барабане, где лента практически мгновенно застывает (со скоростью 10^4…10^6 град. С в секунду) и сбрасывается с него со скоростью 40 м/с на гладкий пол или на отодвигаемый брезент. При этом все содержимое тигля (50 кг) выходит из литейного комплекса в виде свободно летящей аморфной ленты толщиной 25…30 мкм и шириною, например, 50 мм. Примерно за 1,5 минуты из литейного комплекса на пол выбрасывается около 5 км ленты, которую затем вручную работницы сматывают на бобины. Разумеется, набросанную на пол ленту не так легко смотать – на ней образуются изгибы, изломы, зацепы и, в конечном итоге, разрывы. Проблемы

усугубляются при необходимости производства широкой ленты – 150… 200 мм.

Несмотря на значимость проблемы и то, что имеется достаточно много зарубежных и отечественных патентов и публикаций по автоматизации этой заключительной операции в производстве аморфной ленты, реально действующие установки такого назначения неизвестны. Такая ситуация свидетельствует, видимо, о большой сложности инженерного решения данной задачи. С другой стороны трудно поверить, что, скажем в США, где производится более 130 тыс. тонн такой ленты, ее смотка осуществляется вручную и с большой долей отходов. Не исключено, что установки такого назначения у них имеются, но информация о них представляет собой коммерческую тайну.

В научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах кафедры «Автоматы» СПбГПУ, выполняемых по гранту Минобрнауки РФ, поставлена задача исследовать проектную ситуацию и найти принципиальное и конструктивное решение устройства захвата и упорядоченной намотки аморфной ленты. При этом высокая скорость выхода ленты из литейного комплекса (40 м/с), являющаяся первопричиной многих технических проблем, считается заданной, экспериментально проверенной и не подлежащей изменениям. (Хотя в отдельных публикациях называется достаточно широкий диапазон возможной скорости выхода ленты – 30… 60 м/с). Обоснование другого важного ограничения, – усилие натяжения ленты при ее перемотке не должно превышать 10 Н (при какой ширине?), – найти не удалось, кроме чисто логических соображений об ухудшении качества аморфной структуры и магнитных свойств ленты при увеличении усилия ее растяжения. Поэтому в нашем случае исследования проводились при обеспечении усилия натяжения ленты от 5 до 10 Н. Однако, следует иметь ввиду, что при намотке ленты на бобину диаметром до 450 мм (50 кг ленты) на нее будут действовать центробежные силы и силы веса, которые будут дополнительно деформировать ленту.

Еще одной проблемой является то обстоятельство, что вначале с барабана-холодильника сходит некондиционная часть ленты неопределенной длины, которую в имеющихся патентах предлагается отрезать и сбрасывать в тару брака, а кондиционный конец захватывать, например, с помощью магнитов и наматывать на вращающуюся бобину. При этом линейная скорость намотки должна всегда строго соответствовать скорости схода ленты с барабана-холодильника (40 м/с) вне зависимости от увеличения радиуса намотки бобины. Испытания разработанного авторами макета показали, что он обеспечивает точность синхронизации заданного закона вращения бобины с технологическим барабаном с погрешностью не более 2… 5%.

Однако, весьма привлекательной видится идея разработки такого устройства, в котором бы вообще отсутствовала необходимость поимки и захвата отформованной ленты, отрезки некондиционного первоначального конца ленты (Зачем? Его ведь можно всегда легко отрезать при использовании ленты). Суть дела сводится к существенной трансформации конструкции самого литейного комплекса, органически включающего в себя и устройство намотки аморфной ленты. В таком комплексе формирование аморфной ленты могло бы осуществляться не на барабане, а на перематываемой с него на бобину (вместе со сформированной аморфной лентой) охлаждаемой транспортной ленте-спутнике, например, из латуни. Затем полученную слоеную ленту быстро и легко можно перемотать, разделяя ленту-спутник и аморфную ленту на отдельные катушки.

По сути дела это существенно иное принципиальное и конструктивное решение рабочей зоны известной установки. Разумеется, требуется детальная разработка, изготовление и обстоятельная проверка работоспособности такой конструкции. Кафедра «Автоматы» СПбГУП готова выполнить разработку и исследование такой новой установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.Н., Гичев Ю.В., Дьяченко В.А., Петкова А.П. Проблемы разработки и исследования вариантов конструкции автоматизированного оборудования для высокоскоростной намотки аморфной ленты. // Научно – технические ведомости СПбГПУ. – 204, № 3 (130) – С. 132 – 138.
2. Патент RU 1740126.
3. Патент RU 2116159.
4. Патент GB 2096973.
5. Патент US 4.389.868.
6. Патент US 7.055.244.

УДК 621.01

О.Н. Мацко, М.В. Жавнер

НАХОЖДЕНИЕ ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО ПРУЖИННОГО АККУМУЛЯТОРА С ПОСТУПАТЕЛЬНОЙ ПАРОЙ



Милана Викторовна Жавнер, к.т.н.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия Тел.: (812) 552-96-86 Эл.почта: v_javner@inbox.ru



Мацко Ольга Николаевна, ассистент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия Тел.: (812) 552-96-86 Эл.почта: onmatsko@gmail.com

Аннотация

В работе описан порядок нахождения периода колебаний нелинейного пружинного аккумулятора с поступательной парой, значение которого в дальнейшем позволяет перейти к определению жесткости пружины при заданной массе и заданном быстродействии при расчете рекуперативных приводов на базе данного нелинейных пружинных аккумуляторов.

Ключевые слова: период колебаний, нелинейный пружинный аккумулятор, поступательная пара

FINDING OF OSCILLATION TIME FOR A NON-LINEAR SPRING ACCUMULATIOR WITH A SLIDING PAIR

Dr. Milana V. Javner[1], e-mail: v_javner@inbox.ru;
Olga N. Matsko[1], e-mail: onmatsko@gmail.com.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The article is devoted to procedure of finding of oscillation time for a non-linear spring accumulator with a sliding pair; its value subsequently allows to define spring force according to its specified weight and speed performance during calculation of recuperative drives based on non-linear spring accumulators of this type.

Key words: oscillation time, non-linear spring accumulator, sliding pair

Нелинейный пружинный аккумулятор с поступательной парой, представленный на рис. 1, предназначен для применения в рекуперативных приводах технологического оборудования, например, машины для раскатки заготовок сушек Б-58.

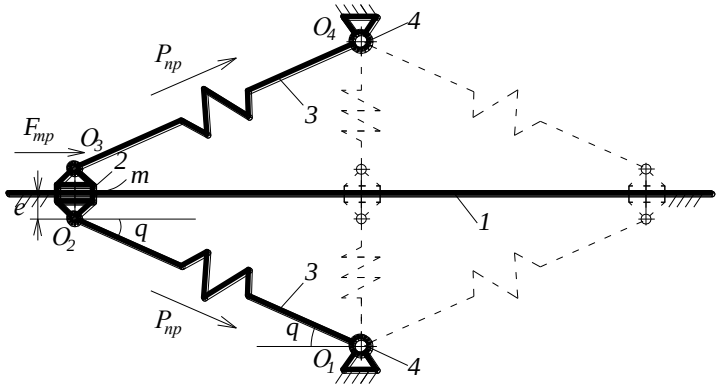


Рис. 1. Нелинейный пружинный аккумулятор с поступательной парой

По направляющей 1 двигается ползун 2 массой *m*. Пружины растяжения 3, расположенные симметрично друг другу, шарнирно соединены с основанием 4 и ползуном 2. В среднем положении ползуна, когда пружины 3 перпендикулярны направляющей 1, усилие пружин равно нулю.

Для упрощения представим данный аккумулятор в виде схемы (рис. 2).

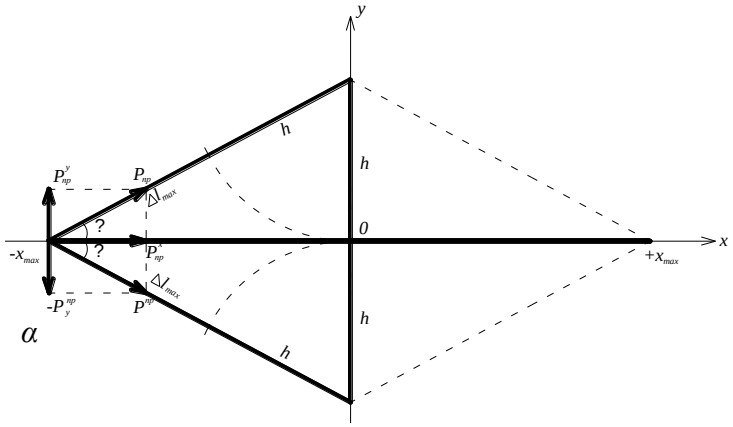


Рис. 2. Упрощенная схема нелинейного пружинного аккумулятора с поступательной парой

Для определенности будем считать, что ползун расположен в крайнем левом положении и движется вправо вдоль оси X ($x < 0$, $x' > 0$). В данном случае диссипативные силы не учитываются.

Пусть орт вектора от ползуна вдоль пружины:

$$\vec{n} = (\cos\alpha,\ \sin\alpha) = \left(\frac{-x}{\sqrt{h^2 + x^2}},\ \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}} \right),$$

где α – угол между направляющей и пружиной

h - длина пружины в состоянии устойчивого равновесия, в данном случае, перпендикулярно направляющей

x – перемещение ползуна по оси X

Тогда находим удлинение одной пружины:

$$\Delta l = \sqrt{h^2 + x^2} - h \tag{1}$$

и ее силу упругости с учетом (1):

$$\vec{P}_{пр} = c\Delta l\,\vec{n} = c\left(\sqrt{h^2 + x^2} - h\right)\vec{n} = c\left(\sqrt{h^2 + x^2} - h\right)\left(\frac{-x}{\sqrt{h^2 + x^2}},\ \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}} \right) =$$

$$= c\left(1 - h/\sqrt{h^2 + x^2}\right)(-x,\ h), \tag{2}$$

где c – коэффициент жесткости пружины

Запишем уравнение движения вдоль оси X:

$$mx'' = -cx\left(1 - h/\sqrt{h^2 + x^2}\right), \tag{3}$$

где x'' – ускорение ползуна

Разделив обе части (3) на массу ползуна m, получим:

$$x'' = -\omega^2 x\left(1 - h/\sqrt{h^2 + x^2}\right), \tag{4}$$

где $\omega^2 = c/m$ – квадрат угловой частоты гармонического осциллятора.

Понизим порядок выражения (4):

$$y\frac{dy}{dx} = -\omega^2 x\left(1 - h/\sqrt{h^2 + x^2}\right), \tag{5}$$

где $y = x'$, $x'' = y\dfrac{dy}{dx}$

Проинтегрировав (5), получим уравнение фазовых траекторий:

$$y^2 + \omega^2\left(x^2 - 2h\sqrt{h^2 + x^2}\right) = C, \tag{6}$$

где C – константа.

Для нахождения C примем, что начальное положение $-x_0$, $x_0 > 0$, а начальная скорость $y_0 = 0$ (задача Коши).

После подстановки в уравнение (6) получим:

$$\omega^2\left({x_0}^2 - 2h\sqrt{h^2 + {x_0}^2}\right) = C. \tag{7}$$

Следовательно, $y^2 + \omega^2\left(x^2 - 2h\sqrt{h^2 + x^2}\right) = \omega^2\left({x_0}^2 - 2h\sqrt{h^2 + {x_0}^2}\right)$.

После преобразований данной фазовой траектории получим:

$$y^2 = \omega^2\left(x_0{}^2 - x^2\right)\left(1 - \frac{2h}{\sqrt{h^2 + x_0{}^2} + \sqrt{h^2 + x^2}}\right) \tag{8}$$

Отметим, что здесь можно делением на h^2 перейти к безразмерной форме.

Введем обозначение:

$$W(x_0, x) = \frac{2h}{\sqrt{h^2 + x_0{}^2} + \sqrt{h^2 + x^2}} \tag{9}$$

Находим скорость по выражению (8) с учетом (9):

$$y = x' = \sqrt{\omega^2\left(x_0{}^2 - x^2\right)\left(1 - W(x_0, x)\right)} = \omega\sqrt{\left(x_0{}^2 - x^2\right)\left(1 - W(x_0, x)\right)} \tag{10}$$

и полпериода:

$$\frac{T}{2} = \int_{-x_0}^{x_0} \frac{dx}{x'} = \frac{2}{\omega}\int_{-x_0}^{x_0} \frac{dx}{\sqrt{\left(x_0{}^2 - x^2\right)\left(1 - W(x_0, x)\right)}} \tag{11}$$

Для упрощения преобразований сделаем следующие замены:

$$z = x/h \text{ и } z_0 = x_0/h \tag{12}$$

и введем еще одно обозначение:

$$V(z_0, z) = \frac{2}{\sqrt{1 + z_0{}^2} + \sqrt{1 + z^2}} \tag{13}$$

Тогда с учетом (12) и (13):

$$\frac{T}{2} = \frac{2}{\omega}\int_0^{z_0} \frac{dz}{\sqrt{\left(z_0{}^2 - z^2\right)\left(1 - V(z_0, z)\right)}} \tag{14}$$

Полученный интеграл является несобственным, т.к. функция под знаком интеграла имеет особенность в точке z_0.

Если проинтегрировать интеграл (14) по частям, получим:

$$\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}\frac{1}{\sqrt{\left(1 - V(z_0, z_0)\right)}} - \frac{1}{2\omega}\int_0^{z_0} arcsin(z/z_0)\,\frac{\left(V(z_0, z)\right)^2}{\left(1 - V(z_0, z)\right)^{3/2}}\,\frac{z dz}{\sqrt{1 + z^2}} \tag{15}$$

Тогда период:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}\left(\frac{1}{\sqrt{\left(1 - V(z_0, z_0)\right)}} - \frac{1}{2\pi}\int_0^{z_0} arcsin(z/z_0)\frac{\left(V(z_0, z)\right)^2}{\left(1 - V(z_0, z)\right)^{3/2}}\,\frac{z dz}{\sqrt{1 + z^2}}\right) \tag{16}$$

Полученное выражение для определения периода колебаний рассматриваемого нелинейного пружинного аккумулятора позволяет перейти к нахождению жесткости пружины при заданной массе и

заданном быстродействии при расчете рекуперативных приводов на базе данного нелинейного пружинного аккумулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. – М.: Наука. – 2006. – 376 с.
2. Жавнер В.Л., Смирнов А.Б. Мехатронные принципы проектирования технологического оборудования // Конструктор-машиностроитель. - 2008. - №3.
3. Вульфсон И.И. Колебания в машинах. Учебн.пособие для ВТУЗов. Изд.2-е, доп./ И.И.Вульфсон; СПбГУТД. – СПб. – 2006. – 260 с.

УДК 58.33.81

А.В. Назаров, А.Н. Попов, Е.А. Чернова

СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГАХ



Александр Владимирович Назаров, Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», ул. Б.Ордынка, 24, Москва, 119017, Россия, тел.: (499)9492342, E-mail: AVNazarov@rosatom.ru



Аркадий Николаевич Попов, профессор, к.т.н., каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: popov@sntspb.ru



Елена Анатольевна Чернова, магистр техники и технологии, каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: l.chernova-stu@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрен стенд для физического моделирования аэродинамических потерь в испытательных центрифугах при различных конструктивных реализациях роторов, кожухов и имитаторов изделий. Представлены первые результаты исследований.

Ключевые слова: центробежный стенд, аэродинамические потери, физическое моделирование.

A.V. Nazarov, A.N. Popov, E.A. Chernova

AERODYNAMIC LOSSES IN TEST CENTRIFUGES SIMULATING MACHINE

Alexander V. Nazarov[1], e-mail: AVNazarov@rosatom.ru;
Ph.D. Arkadii N. Popov[2], Prof.; e-mail: automats@inbox.ru;
Elena A. Chernova[2], e-mail: automats@inbox.ru.
[1]State Atomic Energy Corporation “Rosatom”, Russia;
[2]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The machine for physical simulation of aerodynamic losses in the test centrifuges is considered. Centrifuge allows to simulate the aerodynamic losses of the different design implementations of rotors, casings and simulators of products. The first results of the studies are presented

Key words: centrifugal machine, aerodynamic losses, physical simulation.

Центрифуги, как технологическое оборудование, используются в различных отраслях промышленности. Широко известны крупногабаритные конусные газовые центрифуги для обогащения урана, малогабаритные медицинские центрифуги для анализа крови, центрифуги, создающие искусственную гравитацию, бытовые отжимные центрифуги. Все они относятся к технологическим центрифугам [1].

В организациях приборостроения для нужд флота, авиации, космоса, при создании средств ПВО и в атомной промышленности широко используются испытательные центрифуги. Они предназначены для испытаний на объемные перегрузки в широких диапазонах изменения масс и габаритов объектов: от граммов для изделий микроэлектроники до сотен килограммов для больших приборных блоков и механизмов. Испытания, как правило, проводятся с целью установления безотказности при действии постоянных перегрузок, сохранения правильности функционирования в процессе испытаний или после их окончания. Объектом испытаний может быть и человек; испытания на перегрузки являются типовыми для космонавтов и летного состава пилотирования скоростных самолетов. Такие испытания проводятся на центробежных стендах, в состав которых входят: центрифуга, стойка силового преобразователя, стойка управления и измерения, измерительный и силовой токосъемники. В подавляющем большинстве это одноосные стенды. В них ротор, на который устанавливаются и закрепляются испытуемые объекты, вращается вокруг оси постоянного направления, как правило, вертикальной [2].

Кроме испытательных центрифуг, существуют еще и градуировочные центрифуги, которые предназначены для градуировки и поверки датчиков угловых скоростей, линейных акселерометров. Требования к испытательным и градуировочным центрифугам существенно различаются. Градуировочные центрифуги должны иметь высокие точности, а испытательные должны создавать перегрузки, часто значительные, при невысоких требованиях к погрешности их воспроизведения [3].

Главными параметрами, определяющими основные технические характеристики центрифуг, являются: плечо (базовый радиус), диапазон воспроизводимых ускорений, масса и габаритные размеры объекта,

погрешность воспроизведения ускорения. С точки зрения режима работы важно, как должен работать стенд: воспроизводить постоянные ускорения или ускорения, изменяющиеся по функциональным законам. Эти требования определяют силовые параметры привода и стоимость машины в целом. При этом все перечисленные параметры, за исключением мощности привода, однозначно определяется на первом этапе работы при составлении технического задания (ТЗ).

Мощность сопротивления вращению роторов центрифуг складывается, в основном, из трех составляющих: для разгона и торможения ротора, для преодоления аэродинамического сопротивления и для преодоления сил трения в опорах мотор-шпинделя. Первая и третья составляющие оцениваются относительно просто. Мощность аэродинамических потерь существенно зависит от размеров и формы роторов, испытуемых объектов и камер, в которых они вращаются, и для высокоскоростных центрифуг может составлять сотни кВт [3]. На этапе технического задания ее можно оценить только исходя из аналогов и опыта проектирования, что вносит значительные ошибки. Известны численные методы расчета мощности аэродинамических потерь, использующие специализированные расчетные программы: *ANSYS CFX, Flow Vision, Gas Dynamics Tool, Star-CD, Fluent*. Однако эти расчеты достаточно трудоемки и требуют задания множества исходных данных конструкции, которая на этапе ТЗ еще не проработана. С другой стороны, известно, что только физическое моделирование может дать достоверный результат.

Для выполнения физического моделирования на кафедре «Автоматы» СПбГПУ по заказу Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» разработан и изготовлен лабораторный центробежный стенд. Этот стенд предназначен для моделирования и исследования аэродинамических потерь, а также отладки программного обеспечения и отработки типовых законов воздействия на испытуемые изделия [1]. В состав лабораторного стенда входит центрифуга и устройство управления центрифугой в виде стойки управления и пульта управления со специальным программным обеспечением (рис. 1).

Центрифуга стенда воспроизводит постоянные линейные ускорения, ускорения с постоянным градиентом ускорения и ускорения, заданные в виде функциональных законов:

– диапазон воспроизводимых ускорений на базовом радиусе 300 мм составляет 10…3000 м/с^2;

– диапазон воспроизводимых градиентов на базовом радиусе 300 мм составляет 0,981…49,05 м/с^3.

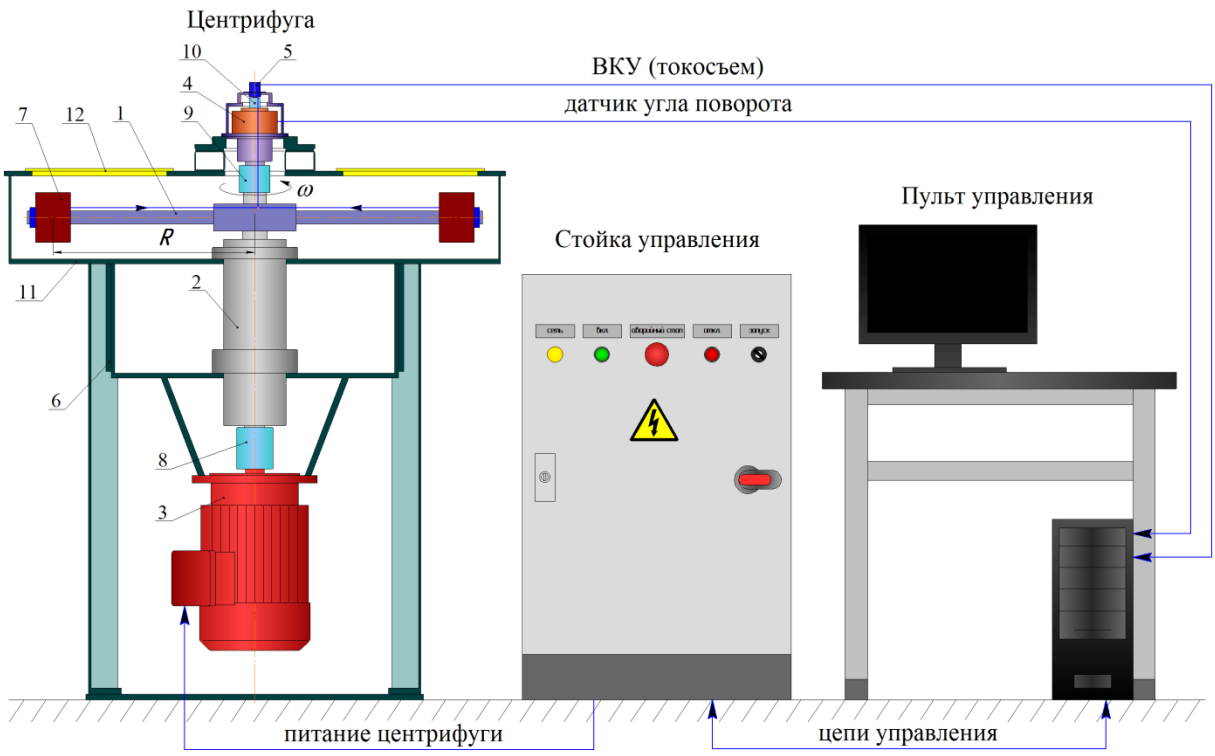


Рис. 1. Структура лабораторного центробежного стенда:
1 – сменный ротор , 2 – шпиндель, 3 – электродвигатель, 4 – датчик угла поворота, 5 – ВКУ, 6 – несущая конструкция, 7 – имитатор изделия, 8, 9, 10 – муфты, 11 - сменный кожух, 12 – люки доступа к ротору

Основные метрологические характеристики стенда:

– суммарная относительная среднеквадратичная погрешность воспроизведения линейного ускорения при доверительной вероятности P = 0,95 — 2 %;

– суммарная относительная среднеквадратичная погрешность измерения линейного ускорения при доверительной вероятности P = 0,95 — 0,1 %.

Физическое моделирование на стенде предполагает исследование влияния различных конструктивных реализаций роторов, кожухов и геометрии изделий на аэродинамические потери. Цель моделирования — верификация аналитических и компьютерных моделей и обоснование рекомендаций при конструировании.

Возможные варианты конструкции ротора:

- ротор в виде диска с имитаторами объектов на торце;
- ротор с одной балкой, однопозиционный;
- ротор с одной балкой, двухпозиционный;
- ротор с двумя балками, двухпозиционный;
- ротор с двумя балками и обтекателями;
- ротор с двумя балками и оснасткой для изделий.

Возможные варианты конструкции кожуха:

- ротор без кожуха;
- кожух цилиндрический;
- кожух граненый (с уступами);
- цилиндрический кожух при варьировании радиальных и осевых зазоров между кожухом и ротором;
- кожух с кольцевыми щелями на оси;
- кожух с кольцевыми щелями на оси и осевыми отверстиями по периферии;
- кожух с кольцевыми щелями на оси и радиальными щелями по образующей;
- кожух без осевых щелей по оси и герметичной периферией.

Общий вид стенда показан на рис. 2. Центрифуга выполнена по схеме с "высоким" ротором и спроектирована таким образом, что позволяет устанавливать роторы, кожухи и имитаторы изделий различной формы и конструкции.

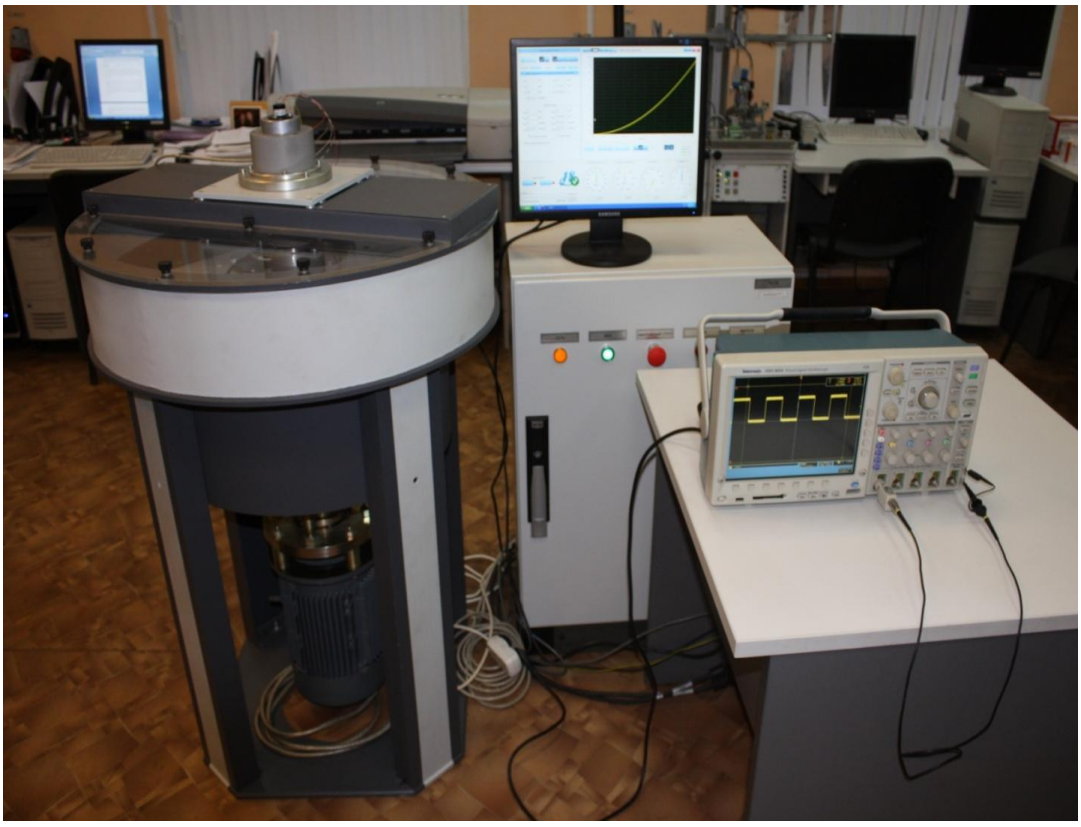


Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда с одним из кожухов и дисковым ротором

На рис. 3 показаны первые результаты экспериментальных исследований двухпозиционного двухбалочного ротора, установленного в кожухе и без него.

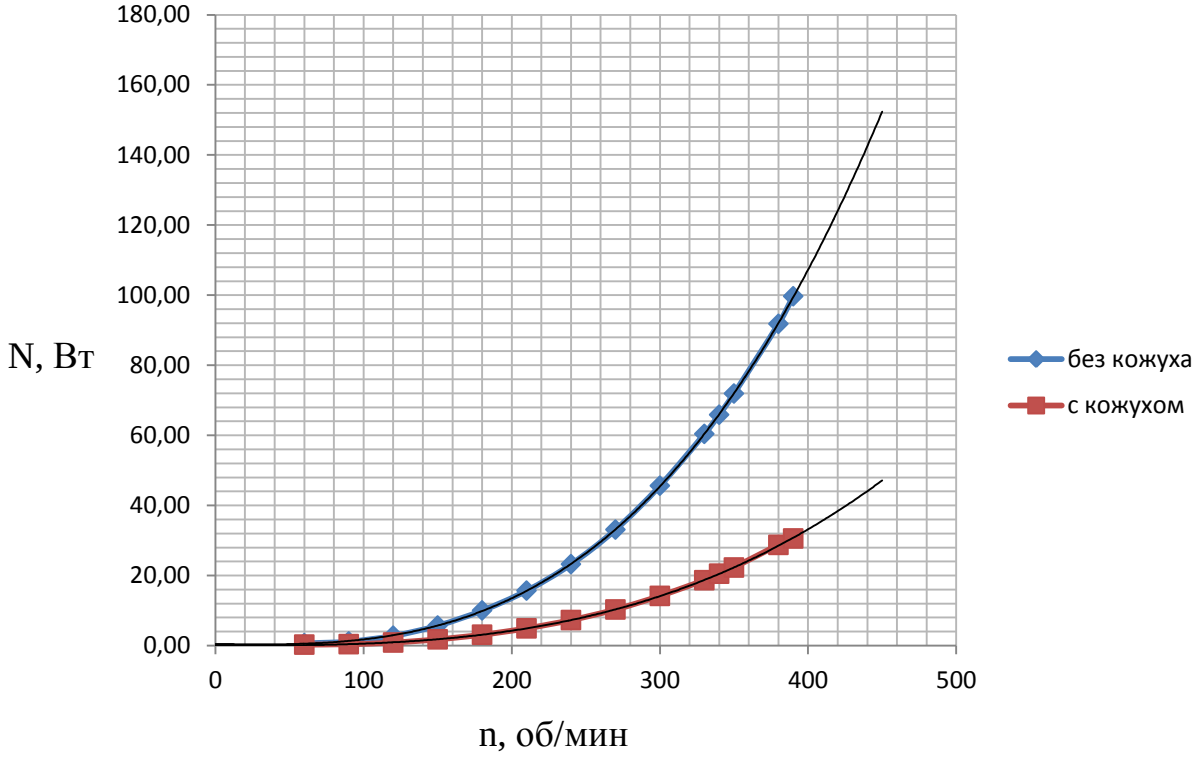


Рис. 3. Графики зависимости аэродинамических потерь от скорости вращения ротора при наличии и отсутствии кожуха

Эти графики хорошо согласуются с теорией, согласно которой момент сопротивления имеет квадратичную зависимость от скорости вращения, а мощность привода, затрачиваемая на преодоление аэродинамического сопротивления, имеет кубическую зависимость от скорости. Явно выделяется влияние кожуха. Следует отметить, что исследования продолжаются; в частности, рассматривается влияние ширины зазора между ротором и кожухом, влияние щелей, влияние формы ротора и т. д.

Помимо исследования аэродинамических потерь созданный лабораторный стенд позволяет определить различные характеристики центрифуг, оценить точность воспроизведения параметров движения, отладить программное обеспечение, выполнить настройку контуров устройства управления, отработать законы движения, апробировать новые конструктивные элементы и комплектующие (датчики, ВКУ и т. п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Отчет о НИОКР «Исследование центробежных стендов для испытания изделий в поле действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка макета лабораторного стенда» // Гос. контракт от 04.07.2012 № Н.4б.44.90.12.1145.

2 Челпанов И.Б. Автоматические технологические машины и оборудование. Испытания машин: Учебн. пособие / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.Л. Жавнера. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2008. – 296 с.
3 Попов А.Н., Тимофеев А.Н., Чернова Е.А. Исследование высоконагруженных роторов испытательных центрифуг // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й. Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 603-614.

УДК 620.1.052.2

С.В. Павлюченко, М.Н. Полищук, Н.Е. Пуленец

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА



Сергей Владимирович Павлюченко, программист I категории, каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: automats@inbox.ru



Михаил Нусимович Полищук, доц., к.т.н., каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: polishchuck@mail.ru



Николай Евгеньевич Пуленец, доц., к.т.н., каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: virus80@mail.ru

Аннотация

Дано описание структуры системы управления лабораторного центробежного стенда. Приведены функциональные законы воспроизводимых на стенде линейных ускорений. Описаны основные режимы работы программного обеспечения стенда, интерфейс оператора, схема и результаты проверки работы стенда.

Ключевые слова: лабораторный стенд, линейные ускорения, программное обеспечение, интерфейс пользователя.

S.V. Pavluchenko, M.N. Polishchuck, N.E. Pulenec

SOFTWARE FOR THE LABORATORY TEST MACHINE

Sergey V. Pavluchenko[1], e-mail: automats@inbox.ru;
Michail N. Polishchuck[1], e-mail: polishchuck@mail.ru;
Nikolay E. Pulenec[1], e-mail: virus80@mail.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

The description of the structure of control system of laboratory centrifugal stand is given. Article shows the major functional laws of playable linear accel-

erations. The basic operation modes of the software, the operator interface, the scheme and the results of the check of work of test machine is in the core.

Key words: laboratory stand, linear acceleration, software, user interface.

На кафедре «Автоматы» в СПбГПУ разработан макет испытательного лабораторного стенда для воспроизведения центробежных линейных ускорений, изменяющихся по требуемым функциональным законам. В состав стенда входит центрифуга и устройство управления со специальным программным обеспечением. Основным назначением разработанного программного обеспечения является формирование данных для формирования необходимых законов изменения ускорений. Эти законы выбираются (или формируются как суперпозиция) оператором из возможных, заранее предусмотренных типовых видов, после чего задаются соответствующие параметры (скорости, ускорения, градиенты и т. д.). Кроме того, программное обеспечение реализует функции контроля состояния элементов стенда (двигателя и преобразователя), запуск системы и ее остановку и, конечно, должно предоставлять оператору удобные условия для работы (дружественный пользовательский интерфейс).

Упрощенная структура системы управления лабораторным центробежным стендом показана на рис. 1.

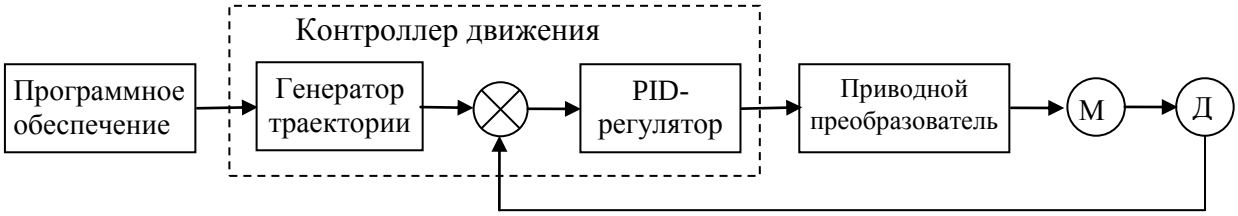


Рис. 1. Структура системы управления

В состав стенда входят контроллер движения NI PCI7342, приводной преобразователь Mitsubishi FR-A540-2.2K, двигатель SEW-EURODRIVE DFV112M6, датчик угла ЛИР-392А-3-Н-125000-05-ПИ. Программное обеспечение передает на контроллер для дальнейшей обработки данные по необходимой (одной из реализуемых на стенде) траекторий движения. Выбранный оператором тип и параметры траектории преобразуются в набор точек, привязанных к углу поворота вала двигателя (ротора центрифуги) с фиксированным шагом по времени.

Контроллер движения состоит из двух основных блоков: генератора траектории и PID-регулятора. Основная функция генератора траектории состоит в интерполяции положения между точками, полученными от управляющего программного обеспечения. Интерполяция производится сплайнами с частотой обновления PID-регулятора. На основе этих данных и сигнала обратной связи от датчика угла PID-регулятор формирует управляющее воздействие на приводной преобразователь.

При использовании внешнего контура управления приводной преобразователь работает как сервоусилитель в режиме прямого регулирования момента. В идеале момент на валу двигателя должен линейно зависеть от сигнала управления на входе преобразователя. На практике всегда присутствует нелинейность и пульсации момента, обусловленные конструкцией двигателя и погрешностями используемой в преобразователе модели двигателя.

В случае применения синхронного или асинхронного привода важную роль играет выбор режима регулирования. Наилучшие показатели точности достигаются в векторном режиме регулирования с подключенным к преобразователю датчиком обратной связи по положению. В рассматриваемом макете использован вольт/частотный режим регулирования. Он обладает худшими характеристиками регулирования чем векторный, но более прост с точки зрения реализации, что важно для макета.

От характеристик двигателя (мощности, номинальной скорости вращения и т. д.) непосредственно зависят возможные значения реализуемых им угловых скоростей и ускорений, которые непосредственным образом определяют диапазоны воспроизводимых на стенде линейных ускорений и их градиентов.

Для работы контура управления на одном валу с двигателем закреплен датчик угла поворота, в качестве которого используется инкрементальный энкодер. Сигнал датчика представляет собой две последовательности периодических сигналов, смещенных друг относительно друга на 90°. Число импульсов в последовательности на оборот формирует разрешающую способность датчика. Дополнительно присутствует сигнал реперной метки. Наличие двух последовательностей позволяет определять угол поворота и направление вращения ротора. Важными характеристиками датчика являются число меток на полный оборот, максимальная частота следования меток (импульсов) или максимальная рабочая скорость вращения, погрешность или класс точности, тип и характеристики выходного сигнала, напряжение питания. Указываемое производителем число меток соответствует числу периодов за оборот вала для одной последовательности сигналов. Реальное число меток, полученное с датчика, может быть увеличено в 4 раза при счете по восходящим/нисходящим фронтам обоих последовательностей. Сигналы с датчика угла в качестве сигналов обратной связи поступают на вход контроллера движения. Кроме того, эти сигналы используются для отображения в окне программы реально воспроизводимой траектории или ее отдельных параметров.

Программное обеспечение стенда разрабатывалось в среде LabVIEW (National Instruments) для операционной системы Microsoft Windows XP. NI°LabVIEW применяется для разработки измерительных систем, испытательных стендов и систем управления. В основе LabVIEW лежит графический язык программирования G. Помимо самой возможности программи-

рования среда LabVIEW предоставляет в распоряжение пользователя широкий спектр инструментов и библиотек: от интерактивных мастеров настройки и пользовательских интерфейсов до встроенных компилятора, компоновщика и средств отладки.

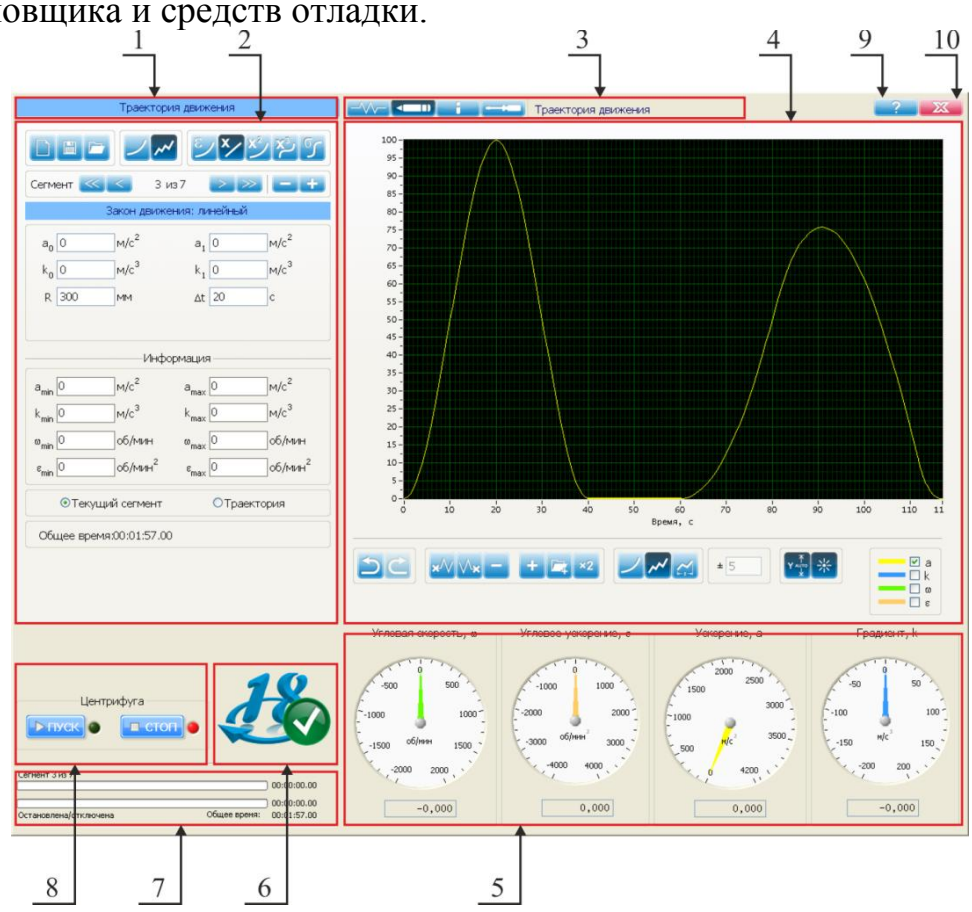


Рис. 2. Окно программы:
1 – строка режима работы, 2 – панель ввода, 3 – селектор, 4 – информационная панель, 5 – стрелочные индикаторы, 6 – индикатор готовности системы, 7 – строка статуса выполнения программы, 8 – кнопки запуска и остановки центрифуги, 9 – кнопка показа подсказок, 10 – кнопка выхода из приложения

Все действия оператора по управлению стендом, заданию режимов его работы и визуализации результатов осуществляются в специальном окне программы после запуска файла с программным обеспечением. Внешний вид окна программы показан на рис. 2. Это окно имеет фиксированный размер и рассчитано на разрешение экрана не ниже 1280×1024.

На практике виды воспроизводимых функциональных законов определяются требованиями заказчиков центробежных стендов, а более точно – требованиями к градуируемому или испытываемому на них оборудованию (приборам). Наиболее часто применяются такие законы изменения линейных ускорений, как постоянный, линейный (с постоянной скоростью изменения ускорения (постоянным «градиентом»), параболический, кубический сплайн, S-образный (сигмоида). Именно эти законы и были реализо-

ваны на макете лабораторного стенда.

• Закон движения с *постоянным угловым ускорением* ε (рис. 3, кривая°1) имеет вид

$$a(t)=\left(\sqrt{\frac{a_0}{R}}+\varepsilon\cdot t\right)^2\cdot R, \qquad (1)$$

где $a(t)$, a_0 – текущее и начальное значения воспроизводимого линейного ускорения, R – радиус воспроизведения (расстояние от оси вращения ротора центрифуги до некой условной точки, в которой воспроизводится ускорение), ε°– угловое ускорение ротора центрифуги, t – время.

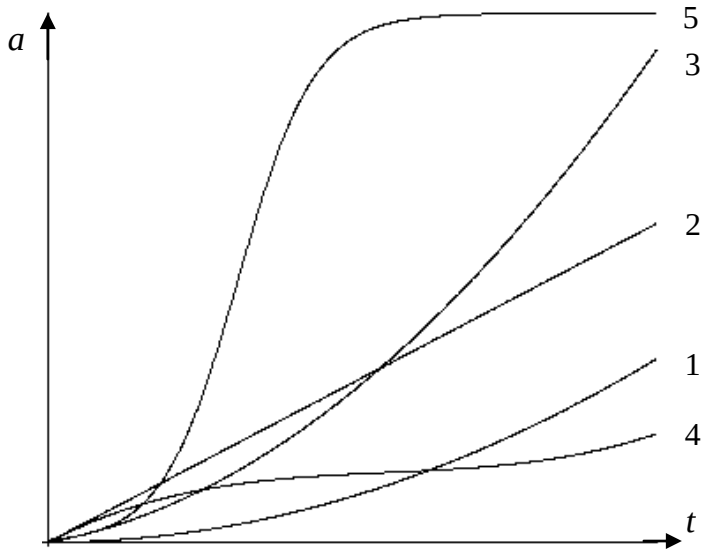


Рис. 3 Функциональные законы воспроизводимого линейного ускорения:
1 – ε = Const; 2 – k = Const; 3 – парабола; 4 – сплайн; 5 – сигмоида

•Закон движения с *постоянным градиентом линейного ускорения* (рис.°3, прямая 2) имеет вид:

$$a(t) = a_0 + k\cdot t, \qquad (2)$$

где k – значение градиента.

Данный закон обеспечивает максимально быстрый переход с одного значения линейного ускорения на другое при постоянном (максимальном) значении углового ускорения. Характерной особенностью закона является скачкообразное изменение градиента до заданного значения. Начальное и конечное значения градиента совпадают.

• *Параболический* закон движения (рис. 3, кривая 3) имеет вид:

$$a(t)=a_0+\frac{a_1-a_0}{(\Delta t)^2}\cdot t^2, \qquad (3)$$

где a_0 – начальное значение ускорения; a_1 – конечное значение ускорения; Δt°– интервал времени движения по траектории.

• Закон движения, описываемый *кубическим сплайном* (кривая 4 на рис.°3), имеет вид

$$a(t) = a_{c3} \cdot \left(\frac{t}{\Delta t}\right)^3 + b_{c3} \cdot \left(\frac{t}{\Delta t}\right)^2 + c_{c3} \cdot \left(\frac{t}{\Delta t}\right) + d_{c3}, \qquad (4)$$

где $a_{c3} = (k_0 + k_1)\Delta t - 2(a_1 - a_0),\ b_{c3} = 3(a_1 - a_0) - (2k_0 + k_1)\Delta t,\ c_{c3} = k_0 \Delta t,$ $d_{c3} = a_0;$ a_0, a_1 – начальное (при t = 0) и конечное (при $t = \Delta t$) значения воспроизводимого ускорения, k_0, k_1 – начальное и конечное значения градиента ускорения, Δt – интервал времени движения по траектории.

Закон движения, описываемый кубическим сплайном, определяется полиномом третьей степени, что позволяет задавать не только значение линейного ускорения в начале и в конце сегмента, но и градиент. Данный закон движения, при определенных условиях, вырождается или в закон движения с постоянным угловым ускорением или в линейный или в параболический закон. В частности:

– линейный закон при $k_0 = (a_1 - a_0)/\Delta t;\ k_1 = k_0 \Rightarrow a_{c3} = 0,\ b_{c3} = 0;$

– квадратичный закон при $k_0 = 0;\ k_1 = 2(a_1 - a_0)/\Delta t \Rightarrow a_{c3} = 0,\ c_{c3} = 0.$

– движение с постоянным угловым ускорением:

$a_{c3} = 0,\ b_{c3} = (\varepsilon \cdot \Delta t)^2 R;\ c_{c3} = 2\sqrt{a_0 / R} \cdot \varepsilon \cdot \Delta t;\ d_{c3} = 0.$

Используя кубический сплайн, можно с известной точностью задавать другие, более сложные (например, гармонические) функции как набор нескольких сегментов из кубических сплайнов.

• *Сигмоида*, или S-образная функция (рис. 3, кривая 5) может использоваться для моделирования скачка или для быстрого сглаженного перехода на другой уровень линейного ускорения. Закон движения в этом случае имеет вид

$$a(t) = \left(\frac{1}{1 + e^{-k_s \cdot \left(\frac{2 \cdot t}{\Delta t} - 1\right)}} \cdot \frac{e^{k_{s_s}+1}}{e^{k_{s_s}-1}} - \frac{1}{e^{k_{s_s}-1}} \right) \cdot (a_1 - a_0) + a_0, \qquad (5)$$

где k_s – коэффициент сигмоиды.

Для удобства задания типа траектории работы в программе предусмотрено два *режима работы*: «Одиночный сегмент» и «Траектория движения». Различия между ними касаются ограничений на задание параметров траектории движения. Режим работы на выполнения центрифугой законов движения не влияет.

Траектория движения строится из отдельных участков (сегментов), для каждого из которых на панели ввода задаются начальные и конечные значения параметров, а также закон их изменения во времени. Помимо этого каждый сегмент характеризуется минимальными и максимальными пределами изменения параметров. Применение сегментов позволяет раз-

бить сложную траекторию на части, которые можно реализовать с помощью относительно простых функциональных законов.

В режиме одиночного сегмента задается один сегмент, а точнее только конечное значение воспроизводимого ускорения, т. к. начальное значение зафиксировано (равно значению ускорения, воспроизводимому центрифугой в данный момент). Этот режим предназначен для проведения простых испытаний с последовательным ручным заданием нужного ускорения и выбором закона движения.

В режиме задания траектории движения число сегментов не ограничено, и оператор может задавать начальное ускорение по своему выбору. Если начальное ускорение траектории движения не совпадает с текущим ускорением, осуществляется автоматический переход к стартовой точке траектории при постоянном угловом ускорении ротора центрифуги, которое задается параметром «Темп разгона/остановки» при настройке центрифуги.

Панель ввода предназначена для задания параметров, определяющих режим работы (закон изменения ускорения), а также ограничений этого режима. На ней размещено несколько групп кнопок, окна для ввода параметров и панель «Информация» для отображения предельных значений параметров воспроизводимого режима (или отдельного сегмента).

Содержание *информационной панели* изменяется в зависимости от выбора оператора. Вкладка *Тренд* (рис. 4) служит для визуального контроля воспроизведения центрифугой заданного закона движения и используется (в основном) для настройки контура управления. По выбору оператора на тренд одновременно можно выводить значения одного из четырех измеряемых параметров (линейного ускорения a, градиента k, угловой скорости ω или углового ускорения ε). Вкладка «*Траектория движения*» (см. в верхней правой части рис. 2) служит для визуализации процесса редактирования. На ней располагается окно для отображения графика и набор кнопок для управления отображением траектории, работы с сегментами, управления графиком. Панель *Статус* служит для диагностики и визуального контроля готовности систем стенда к работе. Панель *Настройка* предполагает выбор единиц измерения, задание ограничений, настройку параметров контроллера и закона управления (параметров ПИД-регулятора). Группа *индикаторов* (стрелочных и цифровых) служит для визуального контроля текущих значений параметров движения.

До начала эксплуатации стенда должны быть регламентированы некоторые важные характеристики, такие как базовый радиус, ограничения реализуемых режимов, темп разгона/торможения ротора. Все эти параметры задаются в специальном окне Настройка.

Группа «Ограничения» задает максимально допустимые значения параметров, превышение которых не допускается программой стенда. Эти значения определяются, в первую очередь, номинальными характеристи-

ками используемого в макете двигателя DV112M6. Кроме того, учитываются геометрические характеристики ротора (радиус, момент инерции), а также максимальное значение воспроизводимого на стенде линейного ускорения согласно техническому заданию. В результате определяются базовый радиус, допустимые значения линейных и угловых ускорений, градиентов.

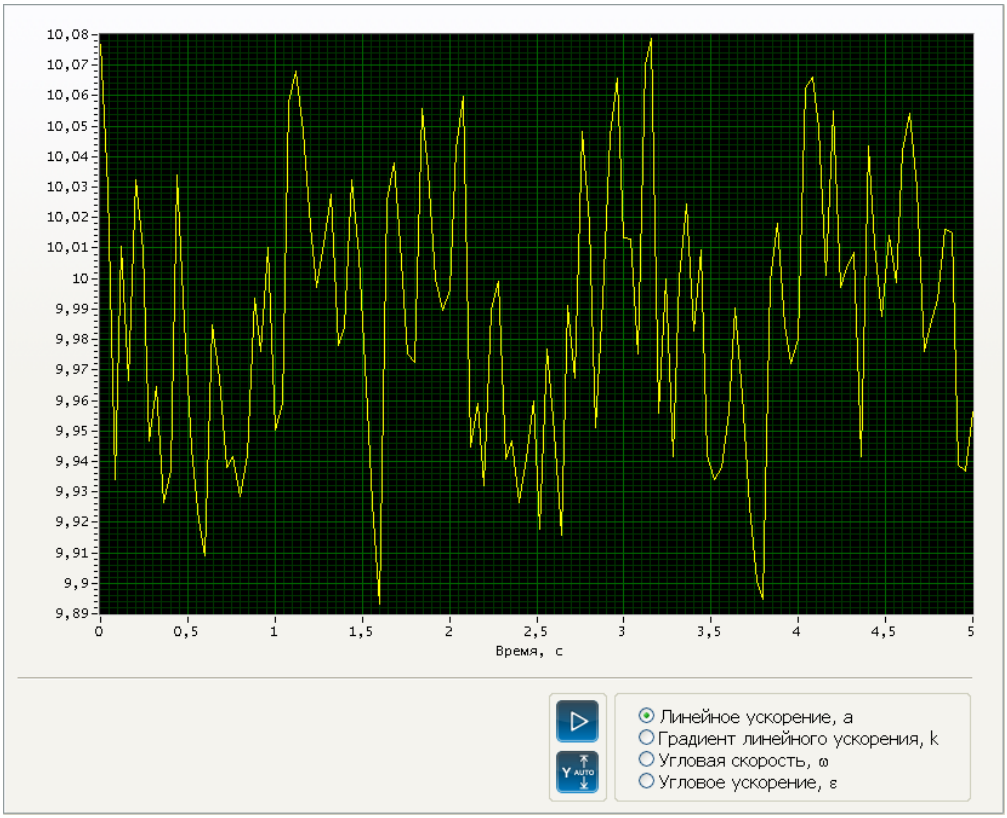


Рис. 4. Вкладка Тренд

Для проверки разработанного программного обеспечения использовался метод прямого измерения с непосредственной регистрацией ускорений, действующих на макет изделия. Сигнал акселерометра выводился на экран осциллографа, сопоставлялись вид и значения ускорений на задаваемой траектории и полученные показания акселерометра (рис. 5: сверху скан экрана дисплея управляющего компьютера в режиме отображения Траектории движения, внизу – копия экрана осциллографа).

Схема измерения ускорений представлена на рис. 6. Акселерометр устанавливался на роторе центрифуги и подключался к регистрирующей аппаратуре через токосъем. В состав оборудования, которое использовалось в измерительной схеме, входили: осциллограф Tektronix MSO4054, мультиметр Mastech M890G, акселерометр Analog Devices ADXL326, токосъем Moog AC6023-12.

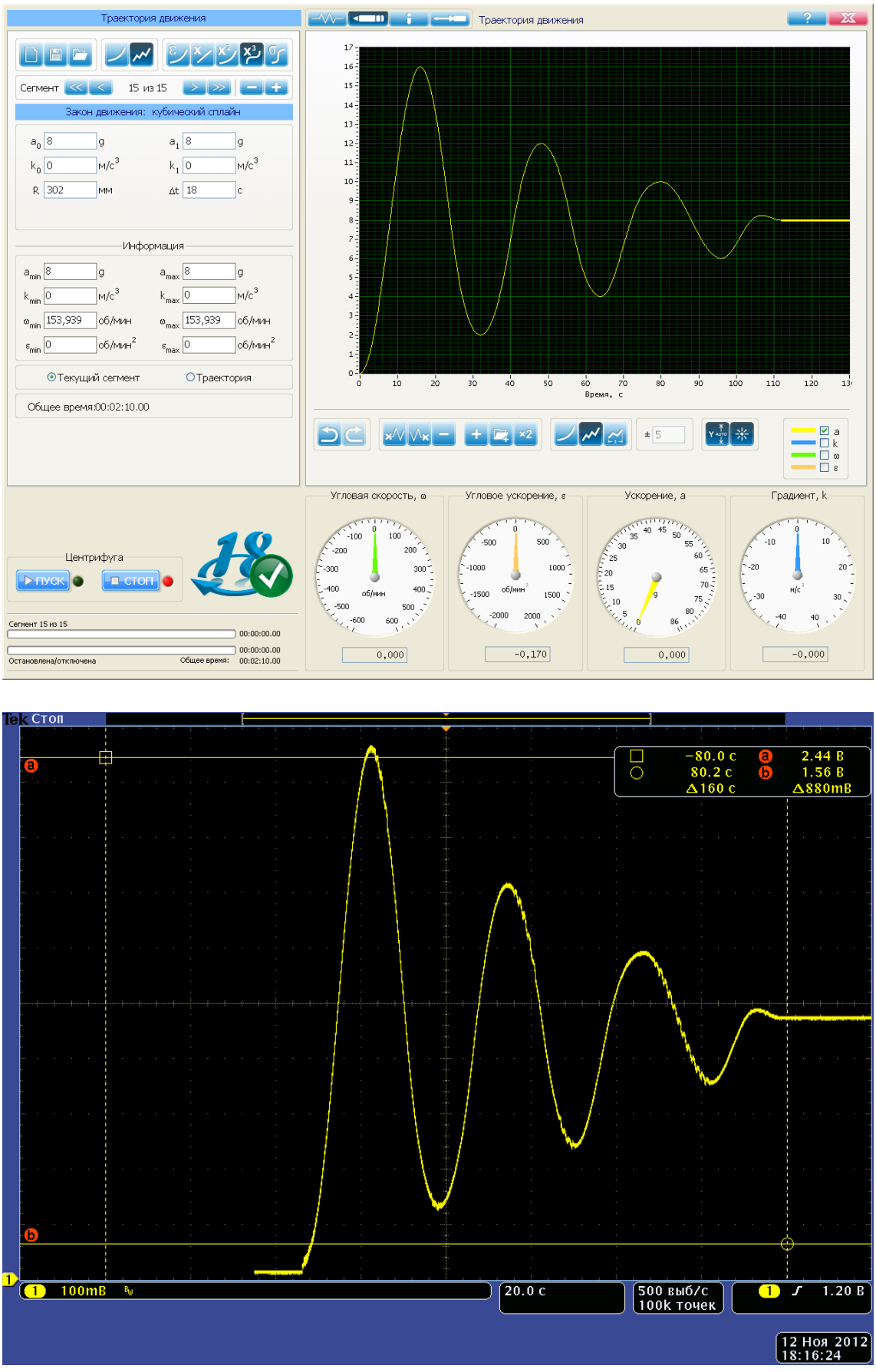


Рис. 5. Составная траектория

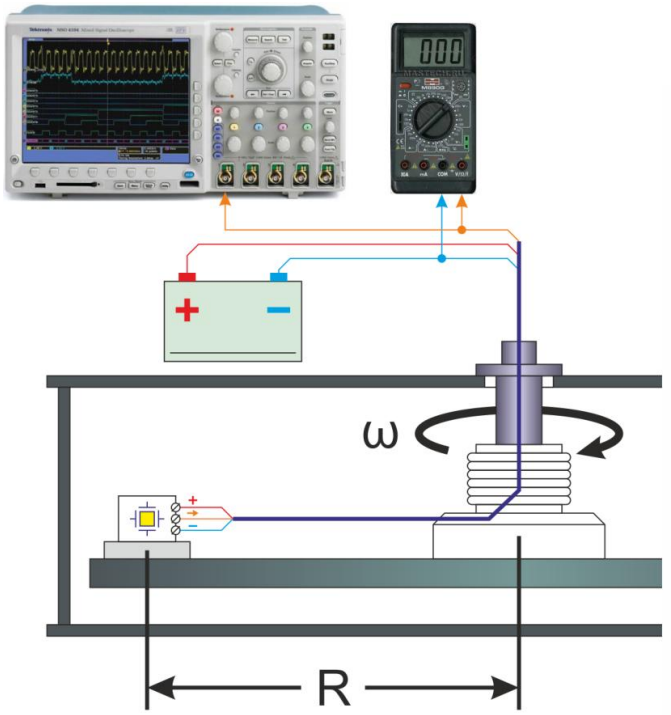


Рис. 6. Схема измерения ускорений

Перед началом измерения ускорений была определена градуировочная характеристика используемого акселерометра и его чувствительность. Экспериментальные исследования показали достаточно хорошее соответствие данных, фиксированных акселерометром, и параметров, задаваемых оператором, что подтвердило работоспособность макета лабораторного стенда в целом и разработанного программного обеспечения в частности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование центробежных стендов для испытания изделий в поле действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка макета лабораторного стенда: отчет о НИР (промежуточный); рук. А. Н. Попов; исполн. М. Н. Полищук [и др.] – СПб, 2012. – 243 с.
2. Исследование центробежных стендов для испытания изделий в поле действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка макета лабораторного стенда: отчет о НИР (заключ.); рук. А. Н. Попов; исполн. М. Н. Полищук [и др.] – СПб, 2012. – 99 с.
3. Павлюченко С. В., Попов А. Н., Пуленец Н. Е., Тимофеев А. Н. Специальное программное обеспечение и аппаратные средства испытательных градуировочных стендов //Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы науч.-практ. конф. СПб: издательство СПбГПУ, 2006. – С. 56-60.

УДК 620.1.052.5

М.Н. Полищук, А.Н. Попов, И.Б. Челпанов, Е.А.Чернова

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГАХ



Михаил Нусимович Полищук, доцент, к.т.н., каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: polishchuck@mail.ru



Аркадий Николаевич Попов, профессор, к.т.н., каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: popov@sntspb.ru



Игорь Борисович Челпанов, профессор, д.т.н., каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: igorchelp@yandex.ru



Елена Анатольевна Чернова, аспирант, магистр техники и технологии, каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: l.chernova-stu@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрены основные факторы, влияющие на аэродинамические потери, возникающие вследствие вращения роторов испытательных центрифуг. Проведена оценка мощности, затрачиваемой двигателем центрифуги на преодоление аэродинамического сопротивления воздуха, для ротора в форме диска. Рассмотрены способы оценки аэродинамических потерь и их снижения для ротора балочного типа.

Ключевые слова: испытательная центрифуга, аэродинамические потери, форма ротора и приспособлений, кожух.

M.N. Polishchuck, A.N. Popov, I.B. Chelpanov, E.A. Chernova

AERODYNAMIC LOSSES IN TEST CENTRIFUGES

Ph.D. Michail N. Polishchuck[1], e-mail: polishchuck@mail.ru,
Ph.D. Arkadii N. Popov[1], Prof.; e-mail: popov@sntspb.ru,

D. Sc. Igor B. Chelpanov[1], Prof., e-mail: igorchelp@yandex.ru;
Elena A. Chernova[1], e-mail: automats@inbox.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The main factors of the aerodynamic losses in the rotors test centrifuges were considered. The engine power overcoming of the aerodynamic resistance for rotor in form disk was estimated. The estimation methods of aerodynamic losses and their decreasing for rotors in form beam were considered.

Key words: test centrifuge, aerodynamic losses, form of rotor and implements, casing.

Для испытательных и градуировочных центрифуг достоверной методики выбора энергетических параметров привода (мощности и вращающего момента) в настоящее время не существует. В технической литературе, посвященной аналитическому и компьютерному моделированию поведения газовой среды, вращение роторов в закрытых кожухах либо не рассматривается вообще, либо расчеты дают результаты, плохо сопоставляемые с экспериментальными данными.

На практике при разработке конструкции градуировочных и испытательных центрифуг и выборе параметров привода ориентируются в основном на личный опыт и аналоги. Так как полных аналогов нового оборудования быть не может, а проектировщики всегда стремятся минимизировать габариты и стоимость центрифуг, то часто имеет место недооценка сил сопротивления и, как следствие, ошибка в выборе параметров привода.

Необходимая мощность привода складывается, в основном, из затрат на разгон и торможение ротора, преодоление сил аэродинамического сопротивления и трения в опорах шпинделя. Последняя компонента относительно невелика, т. к. в современных центрифугах применяются высококачественные опоры. Напротив, мощность, расходуемая на преодоление сил инерции, и аэродинамическая мощность потерь могут быть значительными и составлять сотни киловатт. Причина больших сил инерции заключается в том, что центрифуги имеют прямой привод и, как следствие, значительный приведенный момент инерции, существенно превышающий аналогичную характеристику у других машин. Аэродинамическая мощность потерь особенно велика в высокоскоростных центрифугах с большим плечом ротора. К этому добавляется значительный негативный эффект в виде сильного нагрева испытательных боксов, несущих конструкций, роторов и кожухов. Поэтому при проектировании центрифуг, особенно высокоскоростных, актуальными

являются задачи обоснованного выбора мощности электропривода и снижения этой мощности.

Важными при оценке аэродинамических потерь являются форма ротора и испытуемых изделий (с приспособлениями для их размещения), а также пространство окружающей среды. Кроме того, существенное значение на характер аэродинамических потерь оказывает режим обтекания (ламинарный или турбулентный).

Рассматривая *форму ротора и приспособлений* с точки зрения характера обтекания, можно выделить следующие основные варианты.

1. Вся несущая конструкция ротора, приспособления для установки, сам объект испытаний (изделие) остаются открытыми. Получается плохая обтекаемость, проявляющаяся в общих и местных срывах потоков, сходах вихрей, пульсациях поверхностных давлений и т. д. Все внешние поверхности находятся под воздействием аэродинамических сил, что помимо потерь энергии приводит к повышенным шумам. Переменные аэродинамические давления и акустические воздействия могут вызывать нарушения работы испытуемых объектов, если в них размещается работающая во время испытаний чувствительная аппаратура.

2. Обтекаемые внешние обводы имеет сама несущая конструкция. Это возможно, когда тонкостенная оболочка одновременно является и несущей и формирующей внешнюю гладкую выпуклую поверхность ротора, как поверхность вращения. Значительные преимущества подобной конструкции будут проявляться, когда объект испытаний размещается внутри этой оболочки.

3. Необтекаемая несущая конструкция ротора, приспособления для установки объекта и сам объект испытаний накрываются кожухом, который крепится к основной несущей конструкции. Кожух имеет обтекаемую форму и накрывает всю конструкцию целиком. Возможен вариант, когда кожух закрывает только периферийную часть ротора, дающую наибольший вклад в аэродинамическое сопротивление.

4. Используются отдельные обтекатели для частей необтекаемой несущей конструкции. Например, для испытаний крупногабаритных объектов можно закрывать обтекателем только объект с установочным приспособлением, которые вносят значительный вклад в момент аэродинамических сил.

В смысле *ограничений окружающей воздушной среды* выделяются следующие варианты.

1. Центрифуга размещается не в отдельном помещении, а на отгороженной площадке. Ротор центрифуги не имеет собственного жесткого ограждения, пульт управления и регистрирующая аппаратура находятся за ограждением. Такой вариант допустим только для тихоходных центрифуг с максимальной окружной скоростью до 5 м/с.

2. Ротор центрифуги находится в отдельном помещении и не имеет собственного жесткого ограждения. Стены помещения имеют защиту от срыва объекта испытаний.

3. Ротор центрифуги закрыт специальным аэродинамическим кожухом, или центрифуга находится в специальном бункере (яме).

Относительно режима обтекания отметим следующее. Аэродинамическая сила, действующая на твердое тело в набегающем потоке газа, в общем случае имеет три составляющие: одну — по направлению набегающего потока (это сила аэродинамического сопротивления) и две — перпендикулярно этому направлению (в том числе подъемная сила). Применительно к рассматриваемой задаче оценки аэродинамических потерь важна только сила сопротивления.

Известно, что силы аэродинамического сопротивления в общем случае можно представить, как сумму сил лобового сопротивления (или сопротивления формы) и сил поверхностного трения [1]. Силы поверхностного трения существенны только для тел, имеющих большие размеры и большие площади поверхностей, почти параллельных вектору скорости набегающего потока. Наибольший практический интерес представляет турбулентный режим обтекания, который соответствует большей части режимов работы центрифуг (а при воспроизведении сверхвысоких ускорений вообще является единственно возможным). Турбулентность обычно связывается с завихрениями потоков и срывами пограничного слоя, что вызывает значительные пульсации давления и переменные составляющие сил сопротивления.

Анализ влияния различных факторов на величину аэродинамических потерь далее проводится для наиболее часто реализуемых на практике вариантов формы ротора и типа помещений, где находится центрифуга:

– камера, в которой работает центрифуга, велика по размерам; ротор центрифуги представляет собой диск без кожуха;

– камера, в которой работает центрифуга, имеет небольшие размеры; ротор центрифуги представляет собой диск с кожухом;

– ротор центрифуги представляет собой балку переменного сечения и помещается в кожух.

Для оценки аэродинамических сил в случае, когда *камера с центрифугой имеет большие размеры*, можно использовать решение задачи о расчете аэродинамического сопротивления при вращении тонкого диска с плоскими гладкими поверхностями [1]. Характер течения воздуха определяется безразмерным числом Рейнольдса *Re*. Применительно к вращению диска радиуса *R* можно считать, что

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot \sqrt{a \cdot R^3}}{\eta}, \qquad (1)$$

где ρ, η – плотность и динамическая вязкость среды (воздуха), $a = R \cdot \omega^2$ – воспроизводимое центробежное ускорение, ω – угловая скорость вращения ротора.

Момент сопротивления M (аэродинамический момент) в теории принято выражать через коэффициент момента сопротивления C_M [1]:

$$M = C_M \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R^5 / 4, \qquad (2)$$

причем для турбулентного режима $C_M = 0{,}146 \cdot (Re)^{-1/5}$ [1].

Аэродинамический момент сопротивления при воспроизведении ускорений порядка тысяч g достигает сотен Н·м. Для сравнения, динамический момент, потребный для разгона диска радиусом 1,25 м и толщиной 0,05 м до скорости 200 рад/с (что соответствует ускорению 5000 g) в течение 100 с, составляет 1800 Н·м.

Мощность, необходимая для преодоления сил аэродинамического сопротивления при турбулентном обтекании плоского диска с двух сторон, определяется выражением

$$N = 0{,}037 \cdot \sqrt[5]{\rho^7 \cdot \eta \cdot \mathrm{a}^{14} \cdot R^{16}}. \qquad (3)$$

Даже для гладкого диска, без учета дополнительных потерь от приспособлений с объектами и других факторов, мощность двигателя, расходуемая на аэродинамические потери, составляет десятки киловатт (рис. 1).

Если *диск вращается в кожухе* (замкнутой цилиндрической камере), то на аэродинамику дополнительно влияют также радиальный (кольцевой) зазор t кромки диска с цилиндрической поверхностью и осевой зазор s по всей плоскости диска с плоской стенкой камеры.

Если ширина зазора s между кожухом и диском очень мала (меньше ширины пограничного слоя), то $C_M = 2 \cdot \pi \cdot R / (Re \cdot s)$. Если же ширина зазора s значительна (в несколько раз превышает толщину пограничного слоя), то характер движения меняется и для турбулентного режима $C_M = 0{,}062 \cdot Re^{-1/5}$.

При этом момент сил аэродинамического сопротивления для диска в кожухе примерно в два раза меньше, чем для свободного диска, и практически не зависит от ширины кожуха.

Таким образом, несмотря на кожух, аэродинамические потери остаются достаточно большими, а в статических режимах — превалирующими по сравнению с другими видами энергетических затрат.

Наиболее общая математическая модель формы ротора центрифуги при оценке аэродинамических потерь соответствует *ротору балочного типа* (рис. 2).

Конструкция балки может быть двусторонне симметричной или несимметричной (тогда статическая балансировка осуществляется большим по массе противовесом). Характер обтекания в этих случаях

существенно различается.

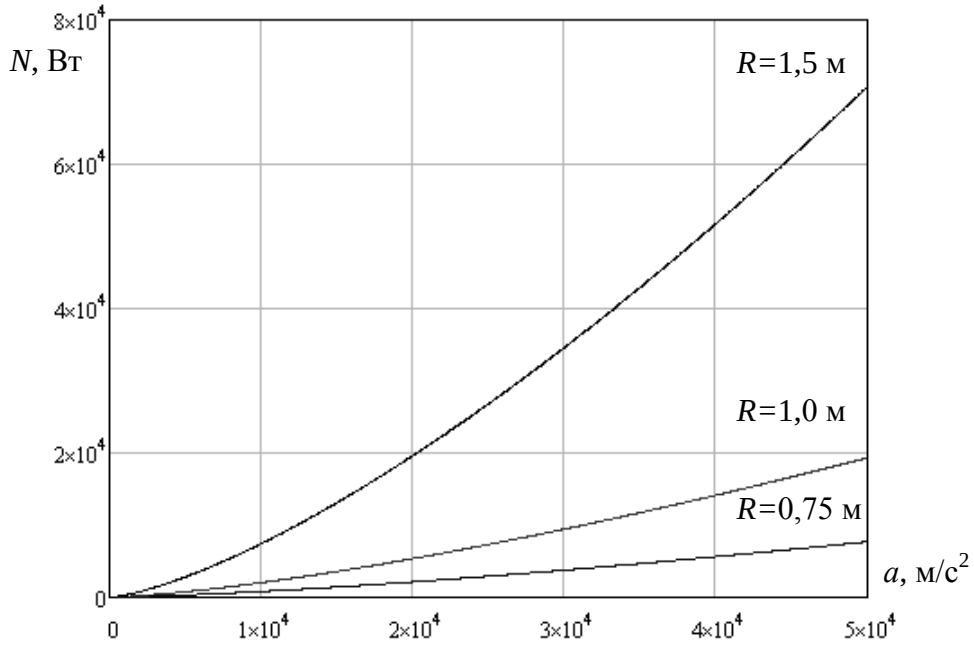


Рис. 1. Зависимость мощности аэродинамических потерь от ускорения

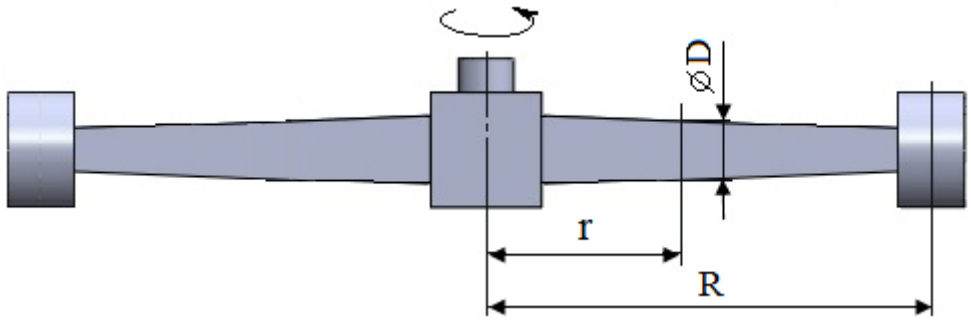


Рис. 2. Модель ротора балочного типа

Простейшая расчетная модель строится на основе цилиндрических сечений; при этом учитываются только тангенциальные потоки, независимые между любыми двумя соосными цилиндрическими поверхностями. В предположении, что в каждом цилиндрическом сечении относительная скорость набегающего на ротор потока такая же, как если вся масса воздуха в кожухе вращается вокруг оси, как единое целое с угловой скоростью ω, получаем для суммарного момента сил аэродинамического сопротивления следующее выражение

$$\mathrm{M} \approx \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \int_{\mathrm{L}} r^3 \cdot c_x(r) \cdot D(r) \cdot dr + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R_0^3 \cdot c_x(R_0) \cdot S_0, \quad (4)$$

где $c_x(r)$ – коэффициент лобового сопротивления участка балки в сечении, расположенном на расстоянии r от оси вращения; $h(r)$ – высота сечения;

R_0 – расстояние от оси до приспособления с испытуемым прибором; S_0 – площадь фронтальной проекции приспособления.

Первое слагаемое в (4) соответствует моменту сил сопротивления протяженной части ротора, а второе – моменту сил сопротивления концевых масс.

Если схема несимметричная, с коротким плечом противовеса, то моменты для обоих плеч считаются отдельно, а затем складываются. Вследствие того, что плечо противовеса намного короче, а момент пропорционален кубу радиуса, достаточно учитывать момент только основного плеча с концевой массой (испытуемым объектом и приспособлением).

Для элементов простых геометрических форм известны коэффициенты лобового сопротивления [2], но формы ротора и приспособлений с изделиями обычно являются сложными. Их разделение на фрагменты, определение сил сопротивления для каждого из фрагментов по-отдельности и суммирование результатов методически неправильно, поскольку обтекание является общим. Для сложных форм результаты могут быть найдены численными методами с использованием специализированных расчетных программ: *ANSYS CFX*, *Flow Vision*, *Gas Dynamics Tool*, *Star-CD*, *Fluent*. Грубые оценки моментов сил сопротивления при вращении можно получить, если в качестве исходных данных использовать только силуэтную фигуру или осевое сечение плеча центрифуги вместе с установочным приспособлением и объектом испытаний. Можно, в частности, в (4) взять некоторое среднее по всем сечениям значение $\bar{c}_x$ коэффициента лобового сопротивления (например, в пределах от 0,7 до 1,0).

При оценке требуемой мощности привода проектируемой центрифуги нужно, в первую очередь, оценить соотношение между двумя слагаемыми в выражении (4). Если испытываются объекты с различными габаритными размерами, то расчеты должны производиться при максимальной возможной площади S_0. Для определения качественной картины обтекания и расчета расходуемой мощности именно аэродинамическое сопротивление объекта может быть доминирующим.

При вращении балочного ротора в кожухе возникают потоки, значительно изменяющие условия обтекания и формирования аэродинамических сил и моментов. Во-первых, возникает круговая циркуляция, при которой воздух вращается, как единое целое в том же направлении, что и ротор, но с меньшей угловой скоростью $\omega^* < \omega$. Очевидно, что отношение ω^*/ω зависит от того, в какой мере проекция ротора вместе с испытуемым объектом перекрывает сечение камеры (кожуха). Типовые варианты, на которых можно качественно иллюстрировать влияние формы осевого сечения и геометрических параметров ротора вместе с объектом, представлены на рис. 3.

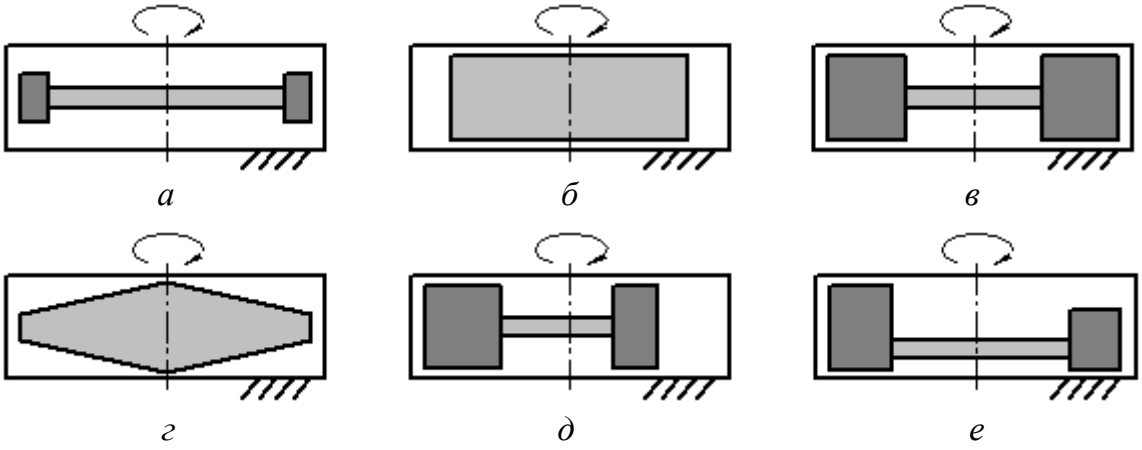


Рис. 3. Типовые варианты формы осевого сечения ротора

Для варианта *а* характерны малые сечения ротора. При такой геометрии можно предполагать, что вовлечение ротором масс воздуха во вращение будет небольшим, и тогда $\omega^* << \omega$. Однако, ввиду малости радиальных зазоров, будут повышенными потери на трение у стенок. В варианте *б*, где вращающаяся плоскость полностью перегораживает всю область, можно ожидать, что основные массы воздуха будут вращаться со скоростью $\omega^* \approx \omega$. Но одновременно с этим будут более интенсивными рециркуляционные потоки в горизонтальной плоскости в каждой из половин. В варианте *в* большие по площади периферийные части будут привлекать к вращению значительные массы воздуха, но наличие больших свободных пространств у оси будет заметно искажать их вращение. В варианте *г* периферия, в основном, остается свободной, от вращения ротора воздушная среда турбулизуется, но лишь в незначительной степени вовлекается во вращение. Варианты *д* и *е* характеризуются явно выраженной несимметрией плеч. Можно предположить, что ближе расположенный противовес с меньшей линейной скоростью может заметно тормозить вращение массы воздуха. Влияние смещения вниз балки, как в варианте *е*, по-видимому, может приводить к увеличению циркуляции в вертикальной плоскости.

Приведенные выше общие представления о характере обтекания и характере потоков воздуха являются основой для планирования экспериментальных исследований. При исследованиях должны варьироваться следующие факторы: относительные размеры сечений концевых масс (по отношению к сечению камеры), радиальные зазоры, осевые зазоры, несимметрия обоих плеч, осевая несимметрия расположения балки, геометрические формы концевых масс, форма камеры.

Аэродинамические свойства объекта испытаний (который, как правило, не предназначен для эксплуатации в условиях мощного потока воздуха) вместе с установочным приспособлением обычно не могут быть изменены. Формы поверхностей оказываются достаточно сложными. Для

грубых оценок можно предполагать, что сила аэродинамического сопротивления приспособления пропорциональна площади проекции на вертикальную радиальную плоскость, а коэффициент сопротивления можно брать как для прямоугольного параллелепипеда или цилиндра. При плохой обтекаемости лобовое сопротивление будет определяться завихрениями за задней частью (тогда коэффициент аэродинамического сопротивления может находиться в пределах 0,6…1,1). Естественно, что при этом мощность привода, расходуемая на преодоление сил аэродинамического сопротивления, будет зависеть в первую очередь от габаритных размеров объектов. Чтобы обеспечить возможность получения требуемых значений перегрузок центробежными силами, необходимо или ограничивать габаритные размеры испытуемого объекта или при проектировании считать по максимуму, предполагая, что объект может занимать по высоте все осевое сечение камеры центрифуги.

При симметричной схеме аэродинамические силы создают только тормозящий момент вокруг оси ротора. В противоположность этому для несимметричной схемы ротора с противовесом сила аэродинамического сопротивления, приложенная к концевой массе на длинном плече, не равна силе, приложенная к противовесу. Вследствие этого при вращении ротора возникает также синхронно вращающаяся (с частотой вращения ротора ω) сила, которая сдвинута на угол 90^0 относительно силы от статического дебаланса.

Если основной вклад в момент аэродинамических сил сопротивления вносит установочное приспособление, то для уменьшения его лобового сопротивления могут быть использованы обтекатели, например, в виде дисковой оболочки. Эта оболочка может закрывать не все цилиндрическое пространство, а только периферийную часть. Дисковая оболочка имеет то преимущество, что она симметрична, при этом система центробежных сил является самоуравновешивающейся.

Возможны съемные обтекатели в форме "свободно падающей капли" с плавным сходом поверхностей под малым углом, которые эффективны в зонах схода потоков с объекта испытаний. Выигрыш оказывается существенным даже при не очень больших относительных удлинениях (соотношение размеров порядка 1:3 или 1:4). Как показывают расчеты, использование обтекателей может уменьшить аэродинамические силы, действующие на объект, в несколько раз (до 3…5). Это важно, если именно лобовое сопротивление объекта вносит основной вклад в затраты мощности. Однако использование обтекателей вызывает серьезные трудности:

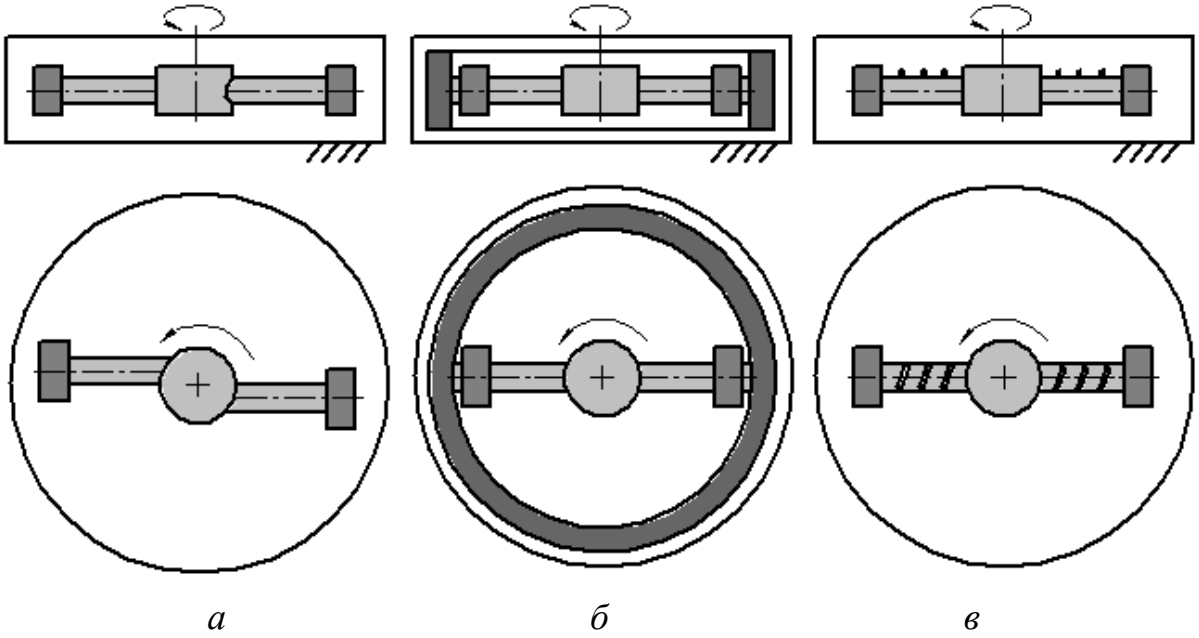
– на обтекатель действуют большие центробежные силы, поэтому его конструкция должна быть достаточно прочной и жесткой; такие же требования предъявляются к средствам крепления обтекателей;

– конструкция должна быть быстроразъемной, вследствие чего она не может быть выполнена в виде жесткой замкнутой (или почти замкнутой) оболочки;

– статическое и динамическое уравновешивание роторов должно осуществляться вместе с обтекателями.

Для более точных оценок модель, построенная на гипотезе цилиндрических сечений, должна быть дополнена с учетом циркуляционных течений. Более простая картина получается для неограниченного пространства. В этом случае основным эффектом является поток воздуха сверху и снизу к центральной части, движение снаружи в радиальном направлении под действием центробежных сил и сход вихрей, получающихся при отрыве пограничного слоя с концов балки и/или концевых масс. Именно на образование этих потоков расходуется значительная мощность привода.

Применительно к ротору центрифуги, вращающемуся на большом удалении от стенок камеры, могут быть рекомендованы различные приемы, препятствующие потокам и тем самым снижающие потери на преодоление аэродинамического сопротивления. В частности, можно отказаться от радиальности балки со смещением ее в сторону, противоположную направлению вращения (рис. 4, *а*), т. е. концами в сторону набегающего потока воздуха, или искривление балки в том же направлении. Однако отклонение продольной оси балки от радиальности приводит к изгибу балки, что при больших перегрузках может существенно снижать запасы прочности.



а *б* *в*

Рис. 4. Способы снижения аэродинамического сопротивления

Еще один прием заключается в использовании широкого наружного кольца (рис. 4, *б*), чтобы обеспечить между ним и цилиндрической стенкой

камеры постоянный зазор, подобрав его из условия минимума потерь на аэродинамическое сопротивление. В результате масса воздуха внутри кольца будет вращаться со скоростью, близкой к скорости вращения ротора. Однако и первая, и вторая конструкции не технологичны.

Другой прием, который может существенно снизить рециркуляционные потоки, заключается в установке на плоскости балки поперечных перегородок по дугам окружностей (рис. 4, *в*), препятствующих радиальному перетеканию воздуха, в частности, могут быть предусмотрены концевые шайбы. Эффективность подобных приемов может быть определена только экспериментально.

При вращении балочного ротора в цилиндрическом кожухе помимо обтекания балки (как в свободной среде) вместо простой картины притока к центральной части и схода вихрей с гладких концов (или концевых масс) имеют место следующие процессы:

– вращение «в среднем» всего объема воздуха, запаздывающее по отношению к вращению ротора;

– циркуляционное движение частиц воздуха по замкнутым траекториям в горизонтальной плоскости вращения ротора в каждой из областей по одну и по другую сторону от балочного ротора;

– циркуляционное движение частиц воздуха по замкнутым траекториям в вертикальной плоскости сверху и снизу, аналогично тому, как это имело место при вращении цилиндрического ротора.

Соотношение мощностей этих потоков и соответственно необходимых мощностей, затрачиваемых на их поддержание, зависит от соотношения размеров сечений и зазоров (радиальных и осевых). Кроме того, следует иметь в виду, что резкой границы между ними нет (в действительности следовало бы задачу рассматривать, как трехмерную).

Для оценки описанных процессов и явлений наиболее эффективным является проведение экспериментальных исследований на макетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1974. — 713 с.
2 Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.
3 Отчет о НИОКР «Исследование центробежных стендов для испытания изделий в поле действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка макета лабораторного стенда» // гос. контракт от 04.07.2012
№ Н.4б.44.90.12.1145.

УДК 62-115

М.Х. Седлер, М.И. Седлер

РАЗРАБОТКА РОБОТА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ РАБОТ ВНУТРИ ТРУБОПРОВОДОВ СЛОЖНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ



Михаил Хаимович Седлер, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Россия, Санкт-Петербург, тел.: (812) 534-0764,
E-mail: robototech@mail.ru



Мария Ильинична Седлер, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (812) 534-0764, E-mail: msedler@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы разработки и изготовления опытного образца робота, предназначенного для осуществления видеоинспекции и измерения в автоматическом режиме остаточной толщины стенок прямолинейных горизонтальных участков подземных трубопроводов. Описаны натурные испытания изготовленного опытного образца робота, в ходе которого была выявлена дополнительная необходимость преодолевать повороты в горизонтальной плоскости. Произведены необходимые геометрические и силовые расчеты новой конструкции многосегментного робота, решающего поставленную задачу.

Ключевые слова: робот для осуществления перемещений и диагностических работ в подземных трубопроводах, натурные испытания опытного образца, геометрические и силовые расчеты многосегментной конструкции, способной преодолевать повороты трубопровода в горизонтальной плоскости.

M. H. Sedler, M.I. Sedler

DEVELOPMENT OF ROBOT FOR DIAGNOSTIC WOTK INSIDE THE COMPLEX PIPING CONFIGURATIONS

Mikhail H. Sedler[1], e-mail: robototech@mail.ru;
Maria I. Sedler[1], e-mail: msedler@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

In the article the issues of development and manufacture of the prototype of the robot, designed for the implementation of the automatic video and measuring of residual thickness of the walls of the straight horizontal sections of underground pipelines. Describes the full-scale tests of manufactured prototype of the robot in Teploset' during of which additional necessity to overcome the turns in the horizontal plane was revealed. The necessary geometrical and power calculations for the new design multi-sectional robot was made.

Key words: robot for the implementation of the movements and diagnostic works in underground pipelines, full-scale tests of a prototype, geometrical and power calculations of multi-sectional design, capable to overcome turns the pipeline in the horizontal plane.

Одной из важных проблем, связанных с эксплуатацией трубопроводных систем, является своевременное выявление аварийно-опасных участков. Основной причиной разрушения труб являются внутренние коррозионные процессы. Последствия коррозионных процессов очевидны - снижается срок службы трубопроводной системы. Вместо нормативных 25-30 лет часто трубы начинают системно разрушаться уже через 5-12 лет работы, в связи с чем увеличиваются затраты на поддержание трубопровода в работоспособном состоянии. В процессе эксплуатации трубопроводов образуются отложения на стенках труб, зарастание сечения, что приводит к дополнительному расходованию электроэнергии и преждевременному износу насосного оборудования, обеспечивающего циркуляцию жидкости в трубопроводе.

Авторским коллективом [1] был разработан и изготовлен опытный образец робота, предназначенного для осуществления видеоинспекции и измерения в автоматическом режиме остаточной толщины стенок прямолинейных горизонтальных участков трубопровода ультразвуковым методом неразрушающего контроля (рис. 1).



Рис. 1. 3D модель робота

В состав технологической головки (рис. 2) входят пневматические устройства зачистки поверхности трубы (1), пневматические механизмы прижима устройств зачистки к поверхности трубы, датчики измерения толщины (2), пневматические механизмы прижима датчиков измерения толщины к поверхности трубы, форсунки подачи воды на датчики, две видеокамеры визуального контроля процесса (3), двухкоординатный электроприводной механизм позиционирования видеокамеры.

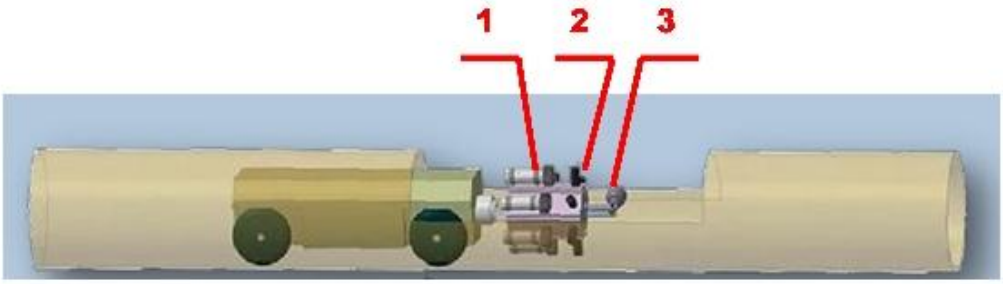


Рис. 2. Элементы технологической головки

Пульт управления находится в специально оборудованном автобусе и содержит видеомонитор для осуществления визуального контроля состояния контролируемого участка трубопровода и процесса измерения, компьютер для регистрации результатов измерений в базе данных. Для обработки и визуализации информации, получаемой от датчиков измерения толщины и видеокамеры в режиме реального времени и сохранения ее в базе данных создано автоматизированное приложение.

С использованием опытного образца робота произведены испытания на заранее подготовленных прямолинейных участках действующего магистрального трубопровода с диапазоном диаметров труб - 400…500 мм, имеющих протяженность до 120 м.

Для проведения испытаний на каждом участке откапывался небольшой участок трубопровода, на котором в диаметральной плоскости вырезалось технологическое отверстие длиной ≈800 мм, предназначенное для установки робота в трубу (рис. 3).



Рис. 3. Установка робота в трубу

Испытания каждого диагностируемого участка осуществлялись в течение 48 часов непрерывной работы в два этапа по следующей технологии.

На первом этапе (рис. 4) осуществлялась видеоинспекция участка. При ее проведении робот производил непрерывное перемещение вперед до конца участка с одновременным вращением видеокамеры 2, направленной на стенку трубы. Оператор наблюдал процесс на мониторе. Одновременно с этим происходила видеозапись, предназначенная для последующего анализа. В случае обнаружения препятствия оператор останавливал движение робота с помощью кнопки ручной остановки пульта управления. В конце диагностируемого участка автоматически происходило завершение этапа: движение робота и вращение камеры прекращались.



Рис. 4. Видеодиагностика участка

На втором этапе производились измерения остаточной толщины стенки трубы диагностируемого участка в сечениях, расположенных с шагом 100 мм. Работы производились при движении робота назад в начало участка с остановками на позициях контроля через каждые 100 мм (рис. 5). Фиксация робота в трубе осуществлялась после остановки робота на позиции контроля с помощью механизма распора, осуществляющего выдвижение и прижим распора к поверхности трубы.

Проведение замеров осуществлялось в шести точках контролируемых сечений следующим образом. После остановки робота производилась зачистка контролируемых сечений – точек контроля с помощью пневматического инструмента. При операции зачистки выполнялись следующие движения:

– выдвижение зачистного инструмента до упора в трубу;
– зачистка точек контроля;
– возврат зачистного инструмента в исходное положение.

После зачистки точек контроля осуществлялось втягивание штока пневмоцилиндра технологической головки. При этом датчики измерения толщины перемещались на позицию замера.

Далее производились измерения толщины в точках контроля. Для этого осуществлялось выдвижение шести датчиков с одновременной подачей

на них воды. Цифровой сигнал от датчиков передавался на компьютер. По окончании измерения отключалась подача воды, осуществлялся возврат датчиков измерения толщины и распора в исходное положение и робот перемещался на 100 мм к следующему контролируемому сечению.

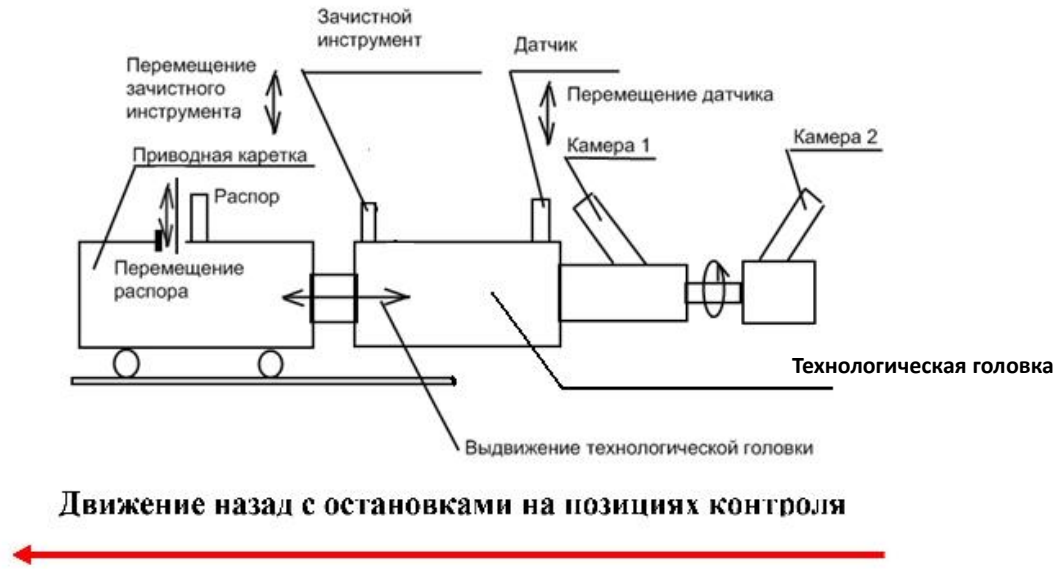


Рис. 5. Измерения остаточной толщины стенки трубы

Помимо сигналов датчиков измерения толщины на компьютер передавалась координата контролируемого сечения - цифровой сигнал от датчика линейного перемещения, определяющего положение робота в трубе. Цифровые сигналы датчиков в реальном времени автоматически заносились в соответствующие поля записи базы данных с указанием времени и даты регистрации.

Оператор наблюдал процесс измерения с помощью видеокамеры 1 на видеомониторе и на мониторе компьютера. При этом на мониторе компьютера в реальном времени отображались координата текущего сечения и толщина трубы. Завершение второго этапа происходило в начале диагностируемого участка. По результатам испытаний автоматически формировался отчет для последующего анализа.

В процессе проведения работ была выявлена необходимость в создании конструкции робота, способного проходить повороты в горизонтальной плоскости. Некоторые диагностируемые участки имели изгибы, которые преодолеть не удавалось. Поэтому приходилось полностью откапывать участок поворота и вырезать по два окна для установки робота в трубу (рис. 6). Такая технология приводила к дополнительным затратам.

В ходе решения проблемы был произведен библиографический обзор, в результате которого установлено, что в настоящее время в ряде университетов США, Германии и ряде компаний промышленно развитых стран ведутся работы по созданию роботов, способных перемещаться по трубопроводам любой пространственной конфигурации. Это, в частности, роботы

немецкой компании INSPECTOR SYSTEMS Rainer Hitzel GmbH и университета Carnegie Mellon (робот Explorer II), способный проводить диагностику состояния газопровода в режиме автономного энергообеспечения и передавать данные от датчика к оператору в режиме реального времени [2].



Рис. 6. Проведение диагностики участка, имеющего поворот

В настоящее время созданы макеты и опытные образцы, однако промышленно выпускаемых роботов такого типа не существует.

Вновь разрабатываемый промышленный робот должен проходить участки трубопроводов, имеющих изгибы в горизонтальной плоскости с геометрическими параметрами трубопроводов: диапазон диаметров труб - от 300 мм до 600 мм, максимальный угол поворота - 90°, минимальный радиус изгиба трубы по средней линии $\geq 1{,}5$ диаметра трубы.

Для обеспечения возможности прохождения поворотов было принято решение исполнить робот многосегментным. Сегменты робота – каретки, габаритные размеры которых должны обеспечивают наличие гарантированного зазора со стенкой трубы. Для определения геометрических размеров кареток был рассмотрен сортамент труб и определены максимальные габаритные размеры сегмента L и H из соотношения

$$(R_c + H/2)^2 + (L/2)^2 = (R_c + D_{\text{вн}}/2)^2 , \qquad (1)$$

где $D_{\text{вн}}$ - внутренний диаметр трубы,

R_c- радиус изгиба.

Схема геометрического расчета максимальных габаритных размеров каретки представлена на рис. 7.

Соединительные звенья кареток должны обеспечивать их взаимное перемещение друг относительно друга для беспрепятственного прохождения поворотов. Движение робота будет осуществляться за счет тягового усилия, создаваемого электроприводными механизмами кареток,

определяющего необходимое количество приводных кареток. Общее количество кареток определяется из необходимости обеспечить нахождение хотя бы одной приводной каретки при прохождении поворота в прямолинейном участке трубы для обеспечения равномерности тягового усилия (не менее 3).

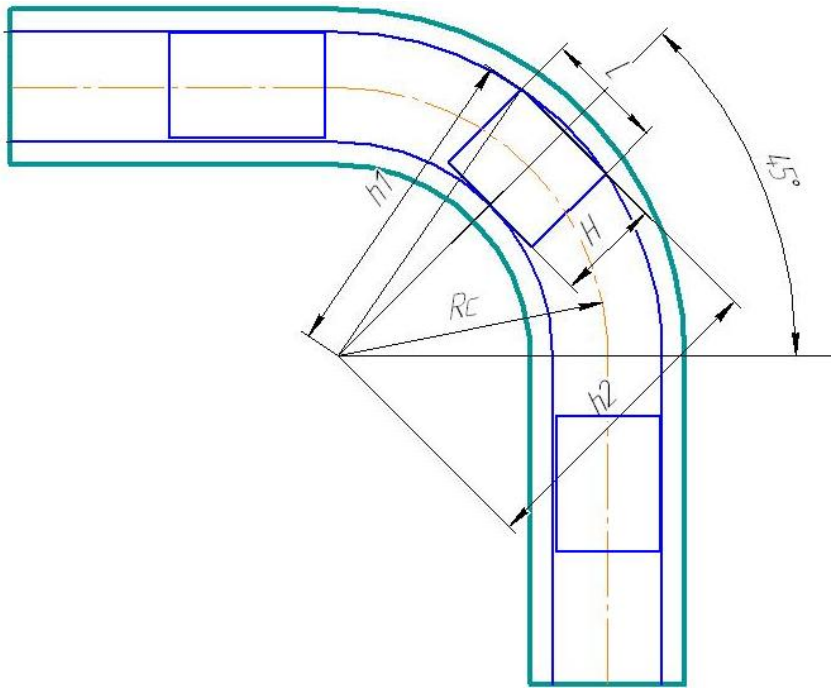


Рис. 7. Схема геометрического расчета максимальных габаритных

Для равномерного прижатия опор качения к поверхности трубы в плоскости прижима в конструкции робота предусмотрен механизм центрирования.

Объемная модель транспортного робота, выполненного в соответствии с описанной кинематической схемой, представлена на рис. 8.

В настоящее время разработана кинематическая схема робота, обеспечивающая необходимую гибкость для прохождения поворотов, спроектированы приводные каретки, произведены необходимые силовые расчеты электроприводных механизмов, разработана кинематическая схема и конструкция механизма центрирования.

Кинематика механизма центрирования робота основана на преобразовании прямолинейного движения штока линейного актуатора в движение распора.

Выбор электродвигателей приводных механизмов робота был произведен с учетом ограничения по напряжению питания (не более 12В), связанного с необходимостью работы в действующем магистральном трубопроводе. В связи с этим при проектировании электроприводных механизмов кареток возникли проблемы, связанные с ограничением

максимальных габаритных размеров для беспрепятственного прохождения поворотов.

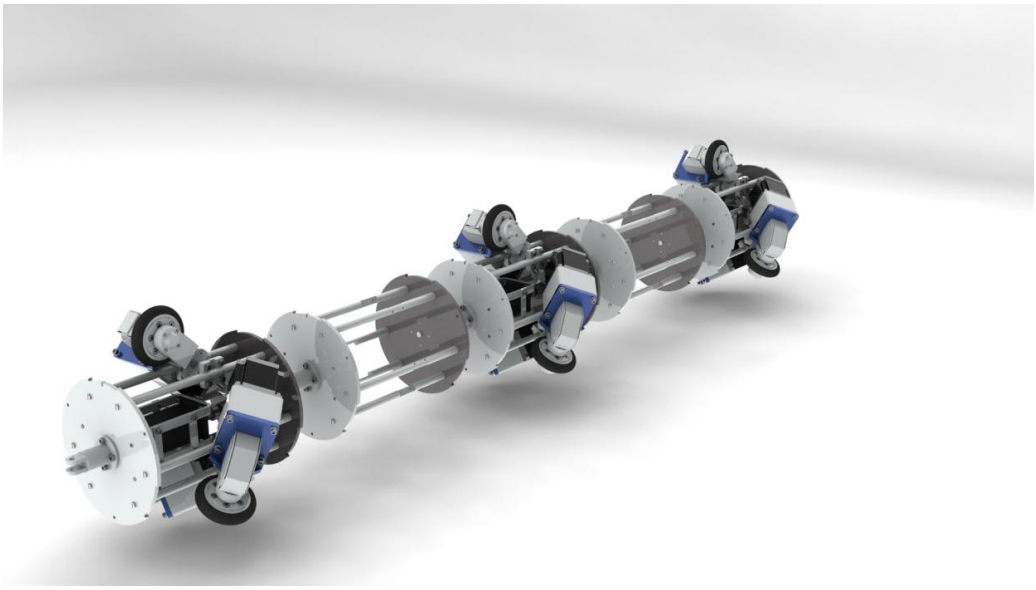


Рис. 8. 3D модель робота

Для передачи крутящего момента на опоры качения разработана конструкция электроприводного механизма с использованием мотор-редукторов с шаговыми двигателями и зубчатых конических передач. Произведенные расчеты показали, что созданная конструкция позволяет обеспечить тяговое усилие порядка 120 кг. Это является необходимым и достаточным условием для приведения робота в движение и преодоление им расстояния до 120 м.

Основным направлением проводимых в настоящее время исследований является поиск возможности повышения тяговых усилий привода путем пересмотра конструкции электроприводного механизма. Для проведения предварительных испытаний будет использован испытательный стенд, представляющий собой кусок трубы из прозрачного материала, содержащий изгибы в горизонтально плоскости на углы до 90°.

Создание робота для проведения диагностических работ внутри трубопроводов сложных конфигураций обеспечит продление срока службы, снизит риск аварий и существенно сократить затраты на ремонт трубопроводных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов В.И., Седлер М.И., Седлер Б.М., Павлова Е.С. / Разработка и изготовление устройств для работ внутри трубопроводов/ Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2008. № 5. С. 90-92.

2. DE-FC26-04NT422264. State-of-the-art review. In-pipe-Assessment Robot Platforms. Carnegie Mellon University. The robotic Institute, Pittsburgh, 2004.
3. ГОСТ 12.2-98. «Роботы промышленные. Роботизированные технологические комплексы. Требования безопасности и методы испытаний».
4. ГОСТ 26050-89. «Роботы промышленные. Общие технические требования».
5. РД 51-2-97. «Инструкция по внутритрубной инспекции трубопроводных систем».
6. Суслов А. А. "Робототехника - 2004" / А. А. Суслов // Строительные и дорожные машины = Construction and road building machinery : Ежемес. науч.-техн. и произв. журн.: Орган Гос.ком-та СМ СССР по автоматизации и машиностроению .— Москва., 2005 .— №1 .— С. 44-47 .— ISSN 0039-2391.
7. Морозов Б. И. Под ред. Е. И. Юревича; СПбГТУ Электромеханические исполнительные системы робототехники : Учеб. пособие / Б. И. Морозов, И.М. Семенов, Е. И. Юревич .— СПб., 1994 .— 80с. — Библиогр.: с.78-79.
8. Юревич Е. И. Основы робототехники : учебник для втузов / Е. И. Юревич - Ленинград : Машиностроение : Ленингр. Отд., 1985 .— 270 с. : ил. - Библиогр.: с. 267-268.
9. Морозов Б.И., Станкевич Л. А., Юревич Е. И. Проектирование средств робототехники: Учеб. Пособие - М., 1990 .— 100с. — Библиогр.: с.99.
10. Никифоров С. О. Изменение компоновочных структур механизмов манипуляционных роботов / С. О. Никифоров, Б. Е Мархадаев, И. Б. Челпанов // Вестник машиностроения: ежемесячный научно-технический и производственный журнал: Орган информации Министерства промышленности и энергетики РФ. – М., 2007. – №3. – С. 9-13. (Конструирование, расчет, испытания и надежность машин). — ISSN 0042-4633.

УДК 620.1.052.5

А.Н. Тимофеев, А.Н. Попов, М.Н. Полищук

УДАРНЫЙ СТЕНД СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ



Александр Николаевич Тимофеев, доцент, к.т.н., каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: automats@inbox.ru



Аркадий Николаевич Попов, профессор, к.т.н., каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: popov@sntspb.ru



Михаил Нусимович Полищук, доцент, к.т.н., каф. «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, тел.: (812)5529686, E-mail: polishchuck@mail.ru

Аннотация

Приведены требования к стендам, предназначенным для проведения испытаний приборов на ударные воздействия. Получена оценка характеристик стенда свободного падения для воспроизведения ударных импульсов заданной степени жесткости. Дано описание разработанного в СПбГПУ стенда КСП5.

Ключевые слова: механические испытания, удар, стенд свободного падения, математическая модель, оценка параметров, описание конструкции.

A.N. Timofeev, A.N. Popov, M.N. Polishchuck

FREE FALL SHOCK MACHINE

Ph.D. Aleksandr N. Timofeev[1], e-mail: automats@inbox.ru,
Ph.D. Arkadii N. Popov[1], Prof., e-mail: popov@sntspb.ru,
Ph.D. Michail N. Polishchuck[1], e-mail: polishchuck@mail.ru,
[1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

The requirements to the shock machines, designed for carrying out tests of devices are described. The estimation of the characteristics of free fall machine for shock pulses of given degree of rigidity is done. The description of the developed in SPbSPU shock test machine KSP5 is given.

Key words: mechanical tests, free fall test machine, mathematical model, the estimation of parameters, description of the design.

Одной из обязательных стадий разработки и создания новых приборов и устройств является их проверка на ударное воздействие. Подобная проверка регламентирована рядом документов, в которых определяются средства, методы и параметры испытаний.

Испытания на удар проводятся на специальном оборудовании, в частности, на стендах свободного падения (стендах копрового типа). Принцип действия ударных стендов заключается в относительно длительном накоплении необходимой для воспроизведения удара энергии и последующем ее высвобождении в течение короткого времени. В стендах свободного падения необходимую энергию накапливают за счет работы против силы тяжести [1]. Требуемую форму ударного импульса обеспечивают применением формообразующего устройства, размещаемого либо на столе ударного стенда, либо на наковальне. В зависимости от способа преобразования кинетической энергии формообразующим устройством могут быть получены импульсы разной формы. Как правило, при воздействии одиночного удара номинальное ускорение в проверочной точке аппроксимируется пилообразным импульсом с пиком на конце, полусинусоидальным импульсом или трапецеидальным импульсом [2]. Каждый из этих видов импульсов имеет определенные преимущества при проведении испытаний. Например, трапецеидальный импульс является наиболее опасным для изделия, пилообразный обеспечивает наилучшую воспроизводимость, а полусинусоидальный проще всего сформировать.

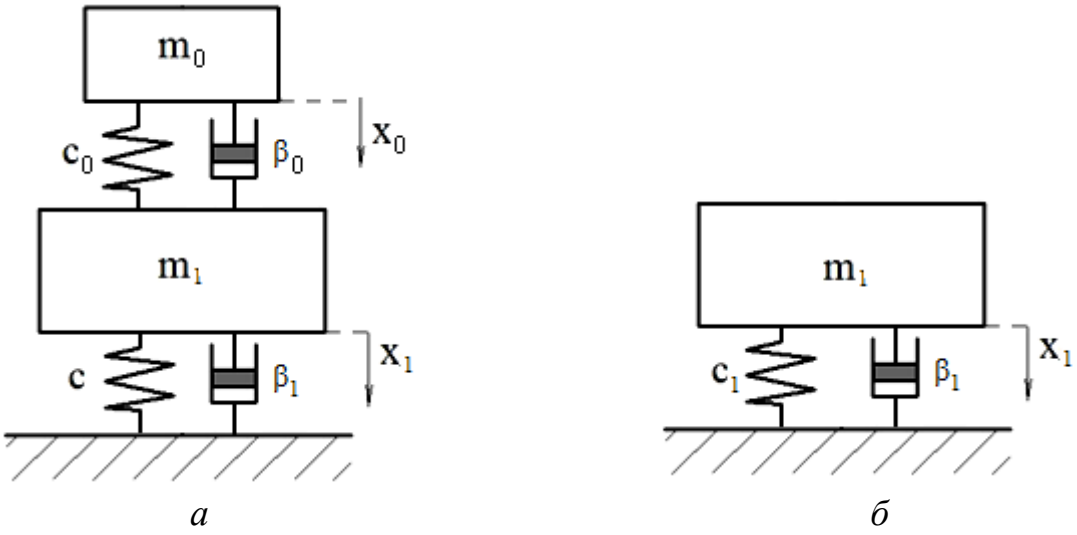
В [2] приведены рекомендации по составу ударного стенда и выбору его элементов. В состав стенда должны входить: жесткий стол с направляющими и элементами крепления объекта испытаний и формообразующего устройства; средства накопления потенциальной энергии, необходимой для воспроизведения удара; устройство для фиксации стола на заданной высоте; механизм высвобождения; наковальня или инерционное тело, с которым происходит соударение стола; устройство формообразования импульса, торможения и возврата; стойка управления и устройство измерения параметров ударного движения.

Устройства и элементы стенда, участвующие в создании движения при воспроизведении ударного воздействия, должны иметь максимальную жесткость, прочность и обладать высоким демпфированием. Если принцип действия ударного стенда предполагает использование инерционного тела,

то его масса и жесткость должны существенно превышать массу и жесткость стола. Инерционное тело должно иметь высокие резонансные частоты, чтобы не влиять на форму ударного импульса. Если необходимо изолировать окружающее оборудование и снизить динамическую нагрузку на здание от воздействия ударов, создаваемых стендом, рекомендуется инерционное тело устанавливать на подвесах с низкой собственной частотой колебаний. Инерционное тело может также использоваться для управления возвратом стола после завершения удара.

Все указанные рекомендации были приняты во внимание при создании ударного стенда КСП5 в СПбГПУ. В частности, учитывалось, что стенд должен работать в составе другого испытательного и измерительного оборудования. Поэтому в техническом задании на проектирование были предусмотрены жесткие требования по предотвращению распространения сейсмических волн после завершения ударного импульса, а в конструкции стенда использован специальный инерционный блок. Для выбора его характеристик, которые бы обеспечивали, с одной стороны, необходимую степень жесткости ударного импульса (сочетание пикового значения и длительности), а с, другой стороны, необходимое ослабление колебаний фундамента, был выполнен оценочный расчет.

Расчет основан на упрощенной модели удара (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Упрощенная модель для исследования удара

Процесс удара условно разбит на несколько стадий. В первой стол с испытуемым прибором с высоты H падает на наковальню, размещенную на инерционном блоке. На наковальне размещен крешер (упругая прокладка), который деформируется при ударе. При линейной характеристике крешера, которая рекомендуется для создания импульса полусинусоидальной формы, имеем следующую двухмассовую модель движения (рис. 1, *а*):

$$\begin{cases} m_0\ddot{x}_0 + \beta_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + c_0(x_0 - x_1) = m_0 g, \\ m_1\ddot{x}_1 + \beta_0(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + c_0(x_1 - x_0) + \beta_1\dot{x}_1 + c_1 x_1 = m_1 g, \end{cases} \quad (1)$$

где m_0 – масса падающего стола с прибором; m_1 – масса инерционного блока; x_0, x_1 – координаты центров инерции стола и инерционного блока соответственно; β_0, c_0 – коэффициент демпфирования и жесткость крешера; β_1, c_1 – коэффициент демпфирования и жесткость подвески инерционного блока.

Система (1) решается при начальных условиях:

$$x_0(0) = 0,\ \dot{x}_0(0) = \sqrt{2gH},\ x_1(0) = 0,\ \dot{x}_1(0) = 0. \quad (2)$$

Если удар происходит с отскоком (а именно такой режим рекомендуется в ГОСТ для создания полусинусоидальных импульсов), то движение стола и инерционного блока после отскока можно рассматривать независимо. Значительная часть энергии падающего стола «уходит» на пластическую деформацию крешера. Поэтому стол отскакивает вверх уже на небольшую высоту и далее существенного влияния на рассматриваемые процессы не оказывает. Следует только отметить, что до момента отскока формируется первая часть ударного импульса, которая очень близка к четверти волны синусоиды. Именно эта часть и определяет пиковое значение ударного ускорения и длительность нарастания импульса. Форма импульса, которая получается после отскока, значительно отличается от «классической».

Пиковое значение ускорения при линейной характеристике крешера определяется, в основном, скоростью стола в момент удара (высотой, с которой падает стол), его массой и жесткостью крешера. Длительность нарастания импульса практически полностью определяется двумя последними параметрами. Масса инерционного блока мало влияет на параметры импульса, а жесткость подвески практически не влияет вообще.

Итак, имеем оценку длительности τ_0 нарастания ударного импульса ускорения

$$\tau_0 = \frac{T_0}{4} = \frac{2\pi}{4\omega_0} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m_0}{c_0}}. \quad (3)$$

Пиковое значение A ускорения можно оценить следующим образом:

$$\int_0^{\tau_0} A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2\tau_0}\right) t \cdot dt = v_0 = \sqrt{2gH} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{\pi\sqrt{2gH}}{2\tau_0}. \quad (4)$$

Инерционный блок на первой стадии удара разгоняется и к моменту отскока стола $t = \tau_0$ приобретает некоторую скорость $v_1 = \dot{x}_1(\tau_0)$, опускаясь на уровень $\xi_1 = x_1(\tau_0)$. Эти значения легко определяются из (1), (2).

Вторая стадия движения наступает в момент отскока. Теперь система может рассматриваться как одномассовая (рис. 1, *б*):

$$m_1\ddot{x}_1 + \beta_1\dot{x}_1 + c_1 x_1 = m_1 g \quad (5)$$

с начальными условиями $x_1(\tau_0)=\xi_1$, $\dot{x}_1(\tau_0)=v_1$.

Понятно, что инерционный блок продолжает движение вниз и после достижения нижней точки пойдет обратно. Жесткость подвески желательно иметь низкую. Тогда процесс движения вниз затягивается по времени и большая часть энергии инерционного блока успеет рассеяться на демпфирующих элементах, что снизит воздействие на фундамент и близко расположенное оборудование. С другой стороны, при малой жесткости подвески увеличивается ход массивного инерционного блока, что нежелательно из-за конструктивных и технологических ограничений. Эти ограничения (а значит и максимально допустимый ход инерционного блока) и определяют жесткость подвески, а также выбор демпфирующих элементов.

На фундамент передается воздействие $F=\beta_1\dot{x}_1+c_1x_1$, которое вызывает его колебания. Для сведения этих колебаний к минимуму фундамент копра помещают на демпфирующее основание в виде слоя песка, шлака, деревянных подкладок и т. п.

Результаты проведенного исследования были использованы при проектировании ударного стенда свободного падения КСП5 (копра свободного падения). Стенд КСП5 предназначен для механических испытаний объектов на ударную прочность и ударную устойчивость при воздействии ударных импульсов ускорения. Ударный импульс создается путем свободного падения стола с закрепленным на нем изделием на наковальню с крешером заданной жесткости.

Основные технические характеристики стенда:

- грузоподъемность копра, кг 200,
- длительность нарастания ударного импульса, мс 5…50,
- пиковое ударное ускорение, м/с^2 100…1000,
- максимальная высота падения стола с изделием, м 5,
- максимальная энергия удара, кДж 15.

В состав стенда (рис.2) входит копер свободного падения и устройство управления стендом: стойка управления, пульты управления, датчики и компрессор (источник питания копра сжатым воздухом).

Основными функциональными частями копра являются: стол для закрепления изделия (объекта испытаний), сбрасыватель стола, механизм подъема сбрасывателя со столом, устройство измерения высоты подъема стола, наковальня с крешерами, инерционный блок, несущая металлоконструкция.

Стол 1 изготовлен из легкого сплава и снабжен стальными резьбовыми втулками, образующими на его поверхности сетку крепежных отверстий. На краях стола имеются катковые опоры 2, благодаря которым стол движется по направляющим 3.

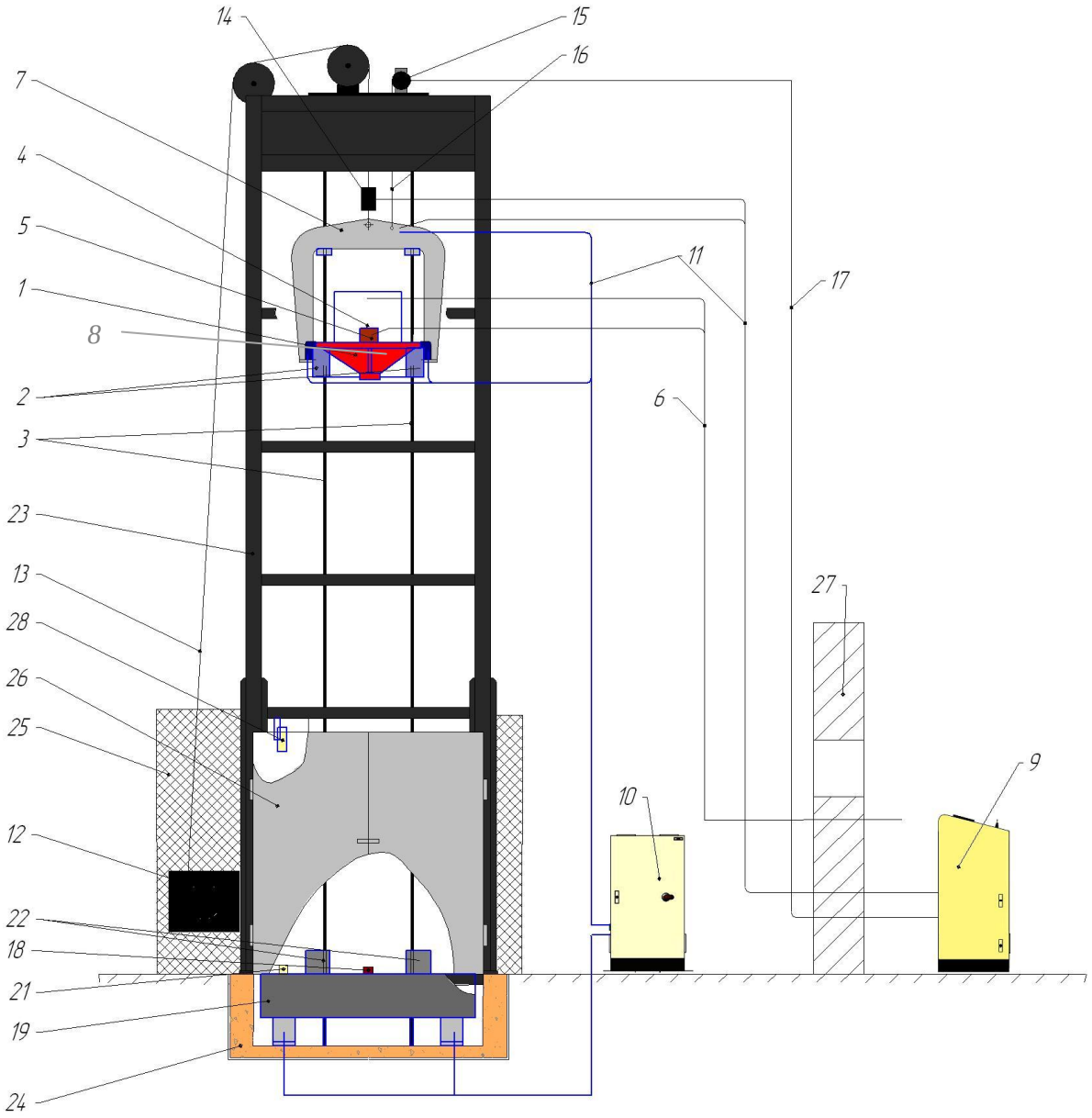


Рис. 2. Стенд КСП5

1 – стол, 2 – катковые опоры, 3 – направляющие струны, 4 – оснастка, 5 – ударный акселерометр, 6 – гибкий кабель, 7 – арка сбрасывателя, 8 – пневмозажимы, 9 – пульт управления, 10 – компрессор, 11 – гибкий кабель, 12 – лебедка, 13 – канат, 14 – датчик натяжения каната, 15 – электронная рулетка, 16 – канатик рулетки, 17 – жесткий кабель, 18 – стальная наковальня, 19 – инерционный блок, 20 – управляемые пневмоподушки, 21 – акселерометр, 22 – механизмы парковки стола в нижнем положении, 23 – несущая конструкция, 24 – фундамент, 25 – защитная сетка, 26 – двери, 27 – стена бокса, 28 – вспомогательный пульт управления

На поверхности стола закреплена технологическая оснастка 4 с объектом испытаний. Также на столе закреплен ударный акселерометр 5. Электрическая связь объекта испытаний и акселерометра с неподвижной аппаратурой осуществляется по гибкому кабелю 6.

Сбрасыватель стола 7 имеет форму арки. На концах арки находятся пневмозажимы 8, удерживающие стол, и механизмы, блокирующие сброс в нештатных ситуациях. Аппаратура управления пневмозажимами и блокирующими механизмами находится на самом сбрасывателе. Связь сбрасывателя с пультом управления 9 и с компрессором 10 осуществляется по рукаву 11, включающему кабель управления и пневматическую трубку. Сбрасыватель, как и стол, движется по направляющим 3, благодаря встроенным катковым опорам.

Механизмы подъема сбрасывателя включают лебедку 12, канат 13, канатные блоки и датчик натяжения каната 14. Лебедка и канатные блоки смонтированы на несущей конструкции копра. Датчик соединяет канат со сбрасывателем. Сигнал с датчика используется для контроля веса оснастки с изделием и управления лебедкой.

Устройство измерения высоты подъема стола построено на основе электронной рулетки 15. Канатик рулетки 16 закреплен на сбрасывателе. Связь датчика рулетки и других датчиков, расположенных на верху копра, осуществляется по жесткому кабелю 17.

Стальная наковальня 18 с прокладками закреплена жестко на инерционном блоке 19. При необходимости, наковальня с крешерами может быть заменена на другое устройство формирования ударных импульсов.

Инерционный блок 19 имеет массу, в несколько раз превышающую массу падающих частей копра. Блок установлен на пневмоподушках 20, управляемых по сигналу акселерометра 21. Помимо наковальни на инерционном блоке установлены механизмы 22 парковки стола в нижнем положении.

Несущая конструкция 23 копра выполнена в виде рам из четырех стоек и перекладин. Внизу стойки усилены ребрами, вверху имеется пояс жесткости и поперечная балка, на которой закреплены контактные блоки, направляющие 3 и другие устройства копра. Стойки внизу закреплены на фундаменте 24. Внутри фундамента выполнена яма, в которой находится инерционный блок 19. Фундамент копра опирается на песчаную подушку.

Рабочая зона копра ограждена сеткой 25 и дверями 26. Имеются датчики, блокирующие работу копра при нахождении оператора внутри рабочей зоны.

Компрессор 10 находится в боксе копра. Компрессор с пневмоаппаратурой питает сжатым воздухом сбрасыватель и пневмоподушки.

Стойка управления стендом 9 находится вне бокса копра за стенкой 27. На стойке расположен главный пульт управления копром. Вспомогательный пульт управления копром 28 расположен внутри рабочей зоны. Сброс стола по команде с этого пульта невозможен.

Управление стендом может осуществляться в ручном и автоматическом режимах. В ручном режиме управление высотой подъема стола осуществляется от кнопочного пульта кнопками «вверх» и «вниз». Пульт оснащен индикатором высоты подъема относительно заданной нулевой точки отсчета. В автоматическом режиме устройство управления обеспечивает выполнение ряда запрограммированных команд: обнулить точку отсчета высоты, переместить стол на заданную высоту относительно точки отсчета и т. п.

Команда «сброс» осуществляется вручную двумя кнопками и только с главного пульта управления. Первая кнопка выключает предохранительный механизм на сбрасывателе. По команде от второй кнопки освобождаются пневмозажимы стола и осуществляется сброс.

Помимо упомянутых выше, на копре установлен набор блокирующих датчиков, обеспечивающих его безопасную работу. Кроме того, копер снабжен прибором для измерения скорости перед ударом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ РВ 20.57.305-98 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства, и оборудование. Методы испытаний на воздействие механических факторов.
2. ГОСТ Р ИСО 8568-2010 Стенды ударные. Заявление и подтверждение характеристик.
3. Челпанов И.Б. Автоматические технологические машины и оборудование. Испытания машин: Учебн. пособие / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.Л. Жавнера. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2008.

ДЕТАЛИ МАШИН. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЁЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ

УДК 669:621.01

M.A. Skotnikova, E.V. Mironova, A.A. Lanina, N.A. Krylov, E.V. Homchenko

STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATION IN MATERIAL OF BLADES OF STEAM TURBINES FROM TITANIUM ALLOY AFTER TECHNOLOGICAL TREATMENT







Margarita Skotnikova[1] Ekaterina Mironova[1] Aleksandra Lanina[1] Nikolai Krylov[1] Elena Homchenko[1]

[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Conducted by means of optical metallography, X- ray microspectral analysis, X- ray structure, electron microscopy was a systematic research structural and phase transformation in blades material of steam turbines from a titanium alloy VT6 after technological treatments on different modes is conducted.

Key words: steam turbines, titanium alloy, structural and phase transformation, electron microscopy.

1 Introduction

In power mechanical engineering the problem of erosive destruction of steam turbines blades is the most important. Complexity of its decision consists that until recently it was not possible to find the general dependence between valuo of wear and a structural - phase condition of surface and axial layers of blades material.

There is an opinion [1], that the greatest resistance to effect of blows by pair drops two-phase alloys with low internal stresses and high plastic properties, in which during time of a stressing there are the phase transformations strengthening a material possess. At effect of blows by pair drops, field sizes of a stressing are commensurable with sizes of structural components, and redistribution of internal stresses between them is impossible. The role of individual durability, intensity, a chemical composition and phase transformations in separate structural components therefore increases.

Two-phase ($\alpha+\beta$) - titanium alloys have found wide application in turbine-structure. As follows from earlier carried out works [2-6], on the basis of complex research of mechanisms of formation and decomposition nonequilibrium

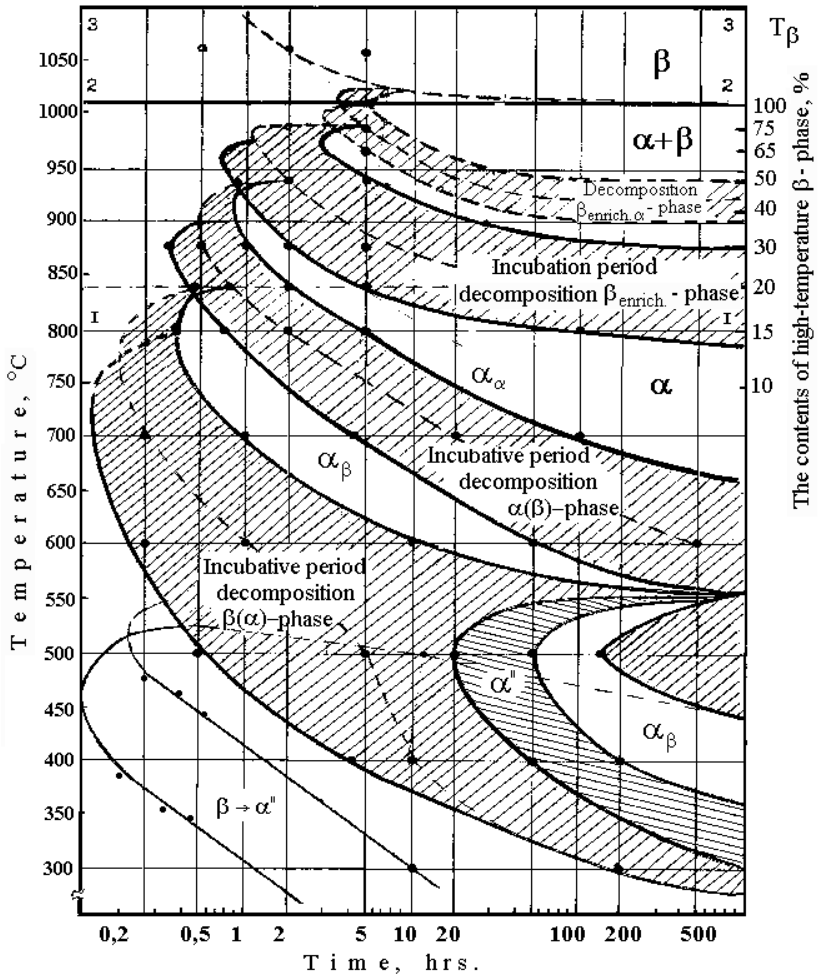


Fig. 1. Generalized kinetic diagram of structure and phase transformation in titanium alloys.

β(α)- and α(β)- phases, redistribution between them of alloying elements, physical and mechanical properties of the deformed titanium alloys of a different alloying, and also the established laws, the generalized kinetic diagram, Fig. 1, has been constructed. Thus it was taken into account not only a temperature of heating absolute (T), but also resulted to the identical contents high-temperature β-phases (T_β). It is established, that the more nonequilibrum β(α)- and α(β)- solid solutions contained same it of alloying elements, the their polystage decomposition occurred at lower temperatures, and for greater time. It is shown, that titanium blanks possesses high technological properties in a temperature-time interval two-phase (α+β)- regions at temperatures identical (50 %) contents high-temperature α- and β- phases (T_{50}) and near to a temperature of transition in single-phase β- region (T_{75}).

The product possesses material high operational properties after an isothermal exposure near to temperature T_{15}. In these cases α- and β- phase components appear enriched same it α- and β- stabilizing alloying elements, in them processes of a polygonezation that causes increase of plasticity characteristics and job of crack origin of alloys develop.

Thus, construction of serial curves of increase of the contents high-temperature β- phases depending on a temperature of heating (a method of hardenings), will allow to estimate the resulted temperatures of heating and to develop the scientifically-grounded modes of technological treatment of titanium blanks [4].

2 Experiment

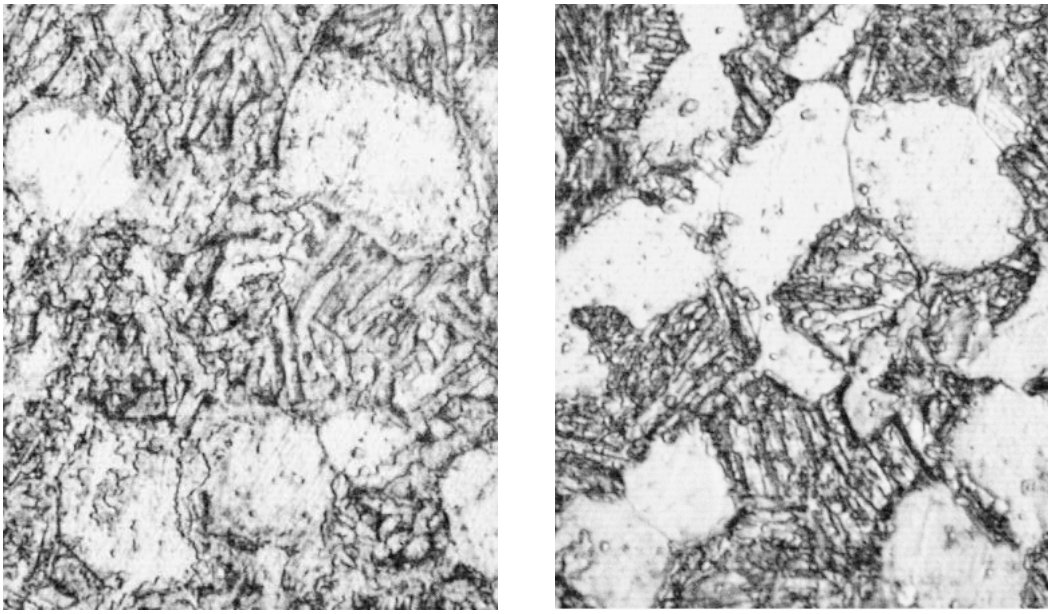
Material for research were the blades of steam turbines from two-phase titanium alloy VT6 (Ti-6Al-4V) average durability after deformation in β- and final deformation by punching in α+β- regions near to resulted temperatures T_{50} and T_{70}, under the first and second technological circuits, accordingly. Contents researches of parameters of separate structural components are carried out to them of alloying elements and a rating of their microhardness. Results have been received with use of methods of an optical metallography, a transmission electronic microscopy and X- ray microspectral analysis. The temperature of final transition of an alloy in β- region (T_{pt}) made 1015°C.

2.1 A Structure and the Phase Composition of Blades Metal

In materials of steam blades turbines from alloy BV6 made punching under both technological circuits, generated a structure bimodal structures: α- the phase had both the form globular (α_I), and the form of extended plates (α_{II}), divided by interlayers β_{II} - phases, Fig. 2. Apparently from electron microscope pictures, Fig. 3, in a substructure of blades metal, received on the first technology, in comparison with the second, borders of all phase components α_I, α_{II}, β_{II} were much better relaxation at the expense of dislocation fine tunings, was less and number of the curved extinction contours, usually testifying to presence at metal of internal stresses.

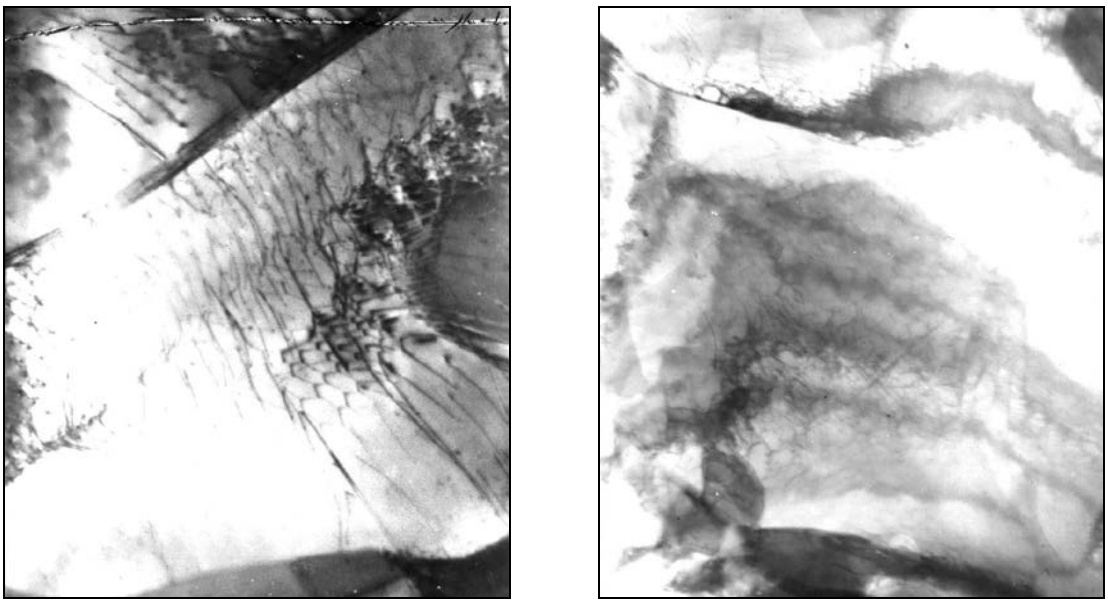
In table 1 results of the sizes rating, the separate structural - phase components received with the help of an optical metallography and a transmission electronic microscopy in materials of steam blades turbines after punchings under two technological circuits are submitted.

As it is visible from table 1, width of plates α_{II} - phases and thickness of β_{II} - layers after the first technology in comparison with the second, appeared more in 3 and 8 times, accordingly. The ratio of width of plates α_{II} - of a phase and β_{II} - layers testifies to different temperature intervals of their formation and speeds of cooling. In blades received on the first technology at lower temperatures, the structure of type vidmanshtetta which on the data a number of authors, surpasses on fatigue strength a martensite-similar structure of blades metal received on the second technology [7] was generated. In materials of both blades with bimodal structure, the size lamellar (β_{II} + α_{II})- a component was more size globular α_I - phases.



10 μm a 10 μm b

Fig. 2. The microstructure blades from alloy VT6 after punching on the first (a) and on the second (b) technologies.



0,5 μm а 0,5 μm в

Fig. 3. The electron microscope structure of material blades from alloy VT6 after punching on the first (a) and on the second (b) to technologies.

Table 1. The particles size of phase components of metal blades, fabricated on two technologies.

	Size of particles of phases after the first technology, [μm]	Size of particles of phases after the second technology, [μm]
α_I	15	12
α_{II}	2,2	0,7
β_{II}	0,8	0,1
$\alpha_{II} + \beta_{II}$	22	18

2.2 Distribution of Alloying Elements in Metal of Blades

In materials of blades steam turbines from alloy VT6 fabricated punching under two technological circuits, had been carried out researches of the contents of alloying elements (aluminum, vanadium, titanium, iron) in separate phase components, with the help X- ray microspectral analysis (Table 2).

As have shown results, in both materials, plates secondary α_{II} - phases had chemical a composition, which approximately corresponded to an average composition of alloy Ti-6AL-4V. In globalizes primary α_{I} - phases, in comparison with plates α_{II} - phases, on the average contained a vanadium less on 2,2 % and aluminum more on 1,3 % (weight).

Narrow layers secondary β_{II} - phases have been enriched with a vanadium (β- stabilizing element).

Table 2. The contents of alloying elements in phase components of metal blades, fabricated on two technologies.

	Concentration after the first technology, [weight %]		Concentration after the second technology, [weight %]	
	AL	V	AL	V
α_{I}	7,30	1,35	6,97	2,04
α_{II}	6,01	3,60	5,68	4,21
β_{II}	4.14	9,64	4,61	8,28

And, in blades material fabricated on the first technology, in comparison with the second, β_{II}- the phase contained a vanadium more on 1,3 % and aluminum less on 0,5 % (weight).

Usually, such distribution of alloying elements provides relative "softness" of layers β_{II} - phase and higher operational properties of product material [8]. On the contrary, globalizes primary α_{I} - phases in blades material fabricated on the first technology, in comparison with the second, contained a vanadium less on 0,6 % and aluminum more on 1,3 % (weight).

On Fig. 4 typical diagrams of distribution of alloying elements with step 0,5 microns received with the help X- ray microspectral analysis, in materials of turbine blades from alloy BT6 fabricated on both technologies are submitted. It is visible, that is most non-uniform in a material the vanadium is distributed, being focused in β_{II}- phase. Its concentration changes from 1 up to 20 %. Aluminum is distributed more similarly, its concentration changes from 3 up to 7 % (weight).

2.3 A Rating of Microhardness of Metal of Blades

In materials of blades of steam turbines from alloy VT6 fabricated under two technological circuits, researches of microhardness of separate phase components have been carried out. In table 3 the data of statistical treatment of results of measurements are submitted.

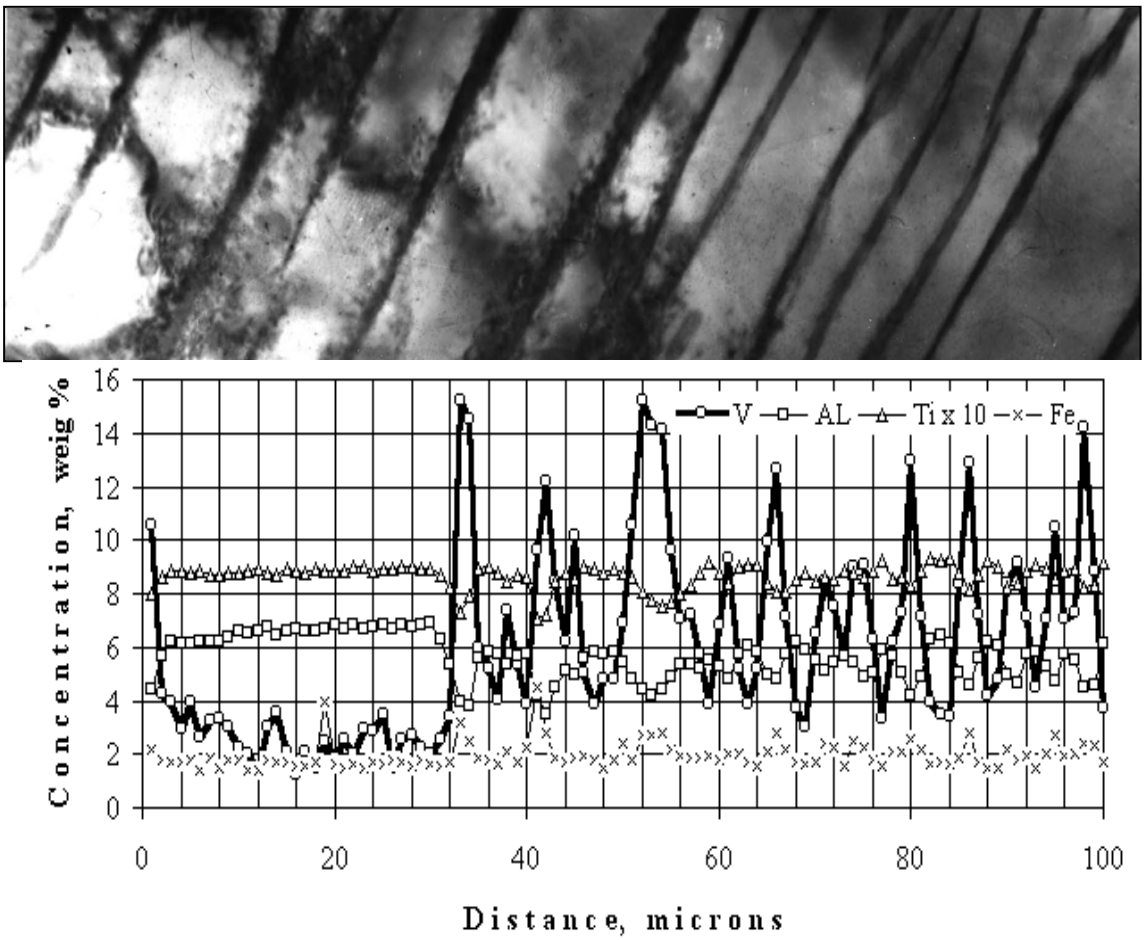


Fig. 4. The microstructure and distribution of alloying elements in structural components of material blades from alloy VT6.

Table 3. Microhardness of phase components of blades metal fabricated on two technologies.

	Microhardness of particles of phases after the first technology, [MPa]	Microhardness of particles of phases after the second technology, [MPa]
α_I	3550	3664
α_{II}	3830	4091
β_{II}	2584	3000
$\alpha_{II} + \beta_{II}$	2999	3020

It is visible, that in blades material fabricated on the second technology, in comparison with the first, the level of microhardness of all phases was higher, that confirms presence of higher internal stresses on which it was already informed above (see section 2.1). The blades material fabricated on both technologies had a bimodal structure. Probably, the strength balance α_I- and ($\alpha_{II} + \beta_{II}$) - structural fashions can guarantees high serviceability of a material under loading. Apparently from table 3, in blades materials fabricated on the first technology, in comparison with the second, the smaller difference in hardness between

globular and lamellar structures, which made 551 and 644 MPa, accordingly has been achieved.

On Fig. 5 correlation dependences of results of measurements of microhardness on a chemical compound of separate phases (α_I, α_{II}, β_{II}) in a condition of delivery and in a martensite phase after hardenings from different temperatures are submitted. It is visible, that microhardness of plate's α_{II}- phases and, especially, globular α_I- particles grows with increase in the contents in them α- and, it is especial, β- stabilizing alloying elements. On the contrary, microhardness of β_{II}- layers considerably decreases with increase in the contents in them β- stabilizers. It is necessary to note, that microhardness of a martensite phase grows with increase in her contents of α- stabilizers, probably, forming α'- the martensite, and decreases with increase of β- stabilizing elements, forming α''- the martensite.

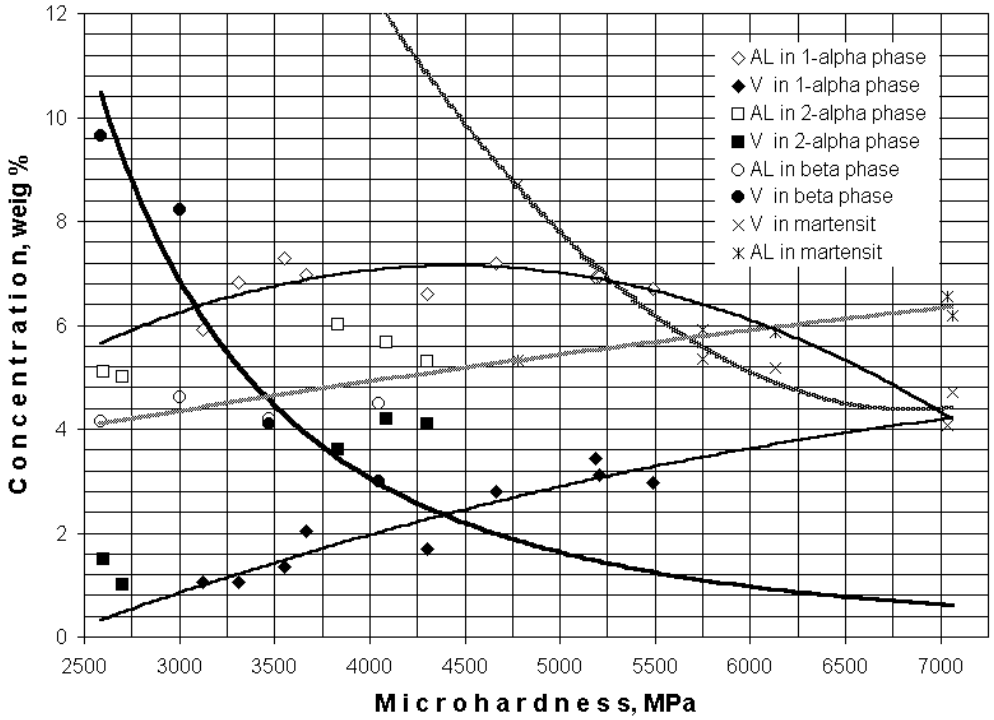


Fig. 5. Dependence of results of a rating of microhardness on a chemical compound of separate phase components (α_I, α_{II}, β_{II}, martensite) alloy VT6.

As it has been shown in section 2.2, in blades material received on the first technology, in comparison with the second, the β- phase with big contents β- of stabilizing alloying elements was generated. It agrees Fig. 5, such distribution of vanadium, really, provides rather smaller microhardness and big "softness" of layers β_{II}- phases.

3 Conclusion

As have shown results of research, blades materials of steam turbines from alloy VT6 fabricated by final punching under two technological circuits had bi-

modal a structure, in which the share lamellar (α_{II} + β_{II})- structures (50…70 %) prevailed of a share globular α_I- structures (30…50 %). The blades material fabricated on the first technology, in comparison with the second, possessed wider layers "soft" β_{II}- the phases, enriched same it β-stabilizers. At the same time, this material contained higher concentration of aluminum in primary globalizes α_I- phases, that provided strength balance (close microhardness) structural components.

It is known, that at cyclic loadings in regular intervals distributed soft faltering layers β_{II}- phases, transiting on the contour of rather solid secondary α_{II}- phases and of strength balance globalizes α_I- phases, complicate premature localization of plastic deformation and origin of a crack in separate phases. And at the stage of distribution, the crack it is more difficult to increase the length in (α_{II} + β_{II})- lamellar structure as it all time is braked by soft layers of β_{II}- phase and is compelled to change the trajectory, bending around globalizes particles α_I- phases. Thus operational properties of product material raise [7-9].

Peculiarity of effect blows by pair loadings is not only recurrence and cyclicity of the enclosed stress, but also its dynamism. By virtue of short duration of influence, internal stresses have not time to be redistributed, there is localization of the big loadings in small microvolumes, in separate structural and phase components of material. The successful combination of structure, chemical compound and properties, abilities to resist to microshock influence of these components, determines durability of products.

Researched alloy VT6 concerns to martensite class, in stable condition contains 10…18 % β- phases, which at sharp cooling turns in $\alpha^{/}$- or $\alpha^{//}$- martensite. However, $\beta \rightarrow \alpha^{//}$- transformation can take place and at room temperature. It is known, that plastic deformation accelerates decomposition enriched β- stabilizers of β- solid solution with education $\alpha^{//}$- phases, as a result of a high level of internal stresses [10]. The subsequent ageing at temperatures 450…500 °C, results to its decomposition and education $\alpha^{/}$ + (β) - phases [11]. Presence of phase transformation $\alpha^{//} \rightarrow \alpha^{/}$ + (β) results in significant strengthening an alloy.

It is possible to believe, that in result of effect blows by pair, in soft enriched of vanadium, wide, regular intervals distributed β- layers there is an accumulation of defects of crystal structure and internal stresses. Transition deformed β- phases in a nonequilibrum condition, causes phase $\beta \rightarrow \alpha^{//}$ – transformation, accompanying with local frictional [12], and as consequence, – the subsequent ageing strengthening of microvolumes of alloy in result $\alpha^{//} \rightarrow \alpha^{/}$ + (β) – transformations. According to generalized kinetic diagram submitted on Fig. 1, the more layers of β- phase contain quantity isomorphic β- stabilizing elements, the at lower temperatures and is longer will proceed $\beta \rightarrow \alpha^{//}$- transformation (more completely). Thus, more significant appears strengthening of borders between solid particles of α- phases and term of operation of finished article will increase, doing its more proof to effect of blows by pair drops.

4 References

1. Deitch M.E, Filippov G.F. Two-phase currents in elements of the heat power equipment. – Monography – Moscow: Enegroatomizdat, 1987. – 328 p.
2. M.A. Skotnikova, A.M. Parshin. Chart of disintegration and mode of a thermal obrakbotka of two-phase alloys of the titan // Metallurgical science and heat treatment of metals. – 1997, V.1. – №7. – P. 31-37.
3. M.A. Skotnikova, A.A. Lanina, N.A. Krylov, E.K. Ivanov. Structural and phase transformations in a blanket of a shovel of the steam turbine at a kapleudarny erosion. Sb. works. Problems of a resource and safe operation of materials. SPb. – 2007, P. 102-107.
4. M.A. Skotnikova, S.S. Ushkov. Development of the scientific principle of a choice of final heat treatment of two-phase hot-rolled semi-finished products from alloys of the titan // Progressive Materials and Technologies. – 1999, №3. – P. 91-98.
5. M.A. Skotnikova, T.A. Chizhik, I.N. Tsybulina, A.A. Lanina, N.A. Krylov. Use of titanic alloys as a material of shovels of steam turbines // Materials science questions. – 2007, V.51. – №3. – P. 61-70.
6. Skotnikova M.A. Lanina A.A. Krylov N.A. Homchenko E.V. Features of a structure of a material of shovels of steam turbines from a titanic alloy of BT6. Sb. works. Problem of materials science at design, production and operation of the equipment of the nuclear power plant. SPb Federal State Unitary Enterprise Central Research Institute KM Prometheus. – 2010, P. 231-238.
7. Js. Park, H. Margolin // Metallurgical Transaction. – 1984, V.15A. – №1. – P. 155-169.
8. I. Holl, K. Khammond // Proceedings Conference Titanium-77, Moscow, Russia, – 1977, V. 1, P. 351.
9. M.A. Skotnikova, T.A. Chizhik, A.S. Lisyansky, O.N. Simin, I.N. Tsybulina, A.A. Lanina Research of working shovels of turbines of big power taking into account structural and phase transformations in metal of stampings from a titanic alloy of BT6 // Metalloobrabotka. – 2009, V.54. – №6. – P. 12-21.
10. Gridnev V.N., Ivasishin O.M., Oshkaderov S.P. Physical bases high-speed thermo - hardenings of titanic alloys. – Kiev, Ukraine: Naukova thought izdat, 1986. – 256 p.
11. M.I. Yermolov, O.P. Solonina // Physics of metals and metallurgical science. – 1967, V.23. – №1. – P. 63-69.
12. Fedotov S.G., Konstantinov K.M. New Constructional Material – the Titan. – Monography. – Moscow: Machine industry izdat, 1987. – 220 p.

УДК 62-762.4, 62-762.8, 678

А.А.Ашейчик, В. Л. Полонский

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ СТАРЕНИИ



Анатолий Анатольевич Ашейчик, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-64-29, e-mail: aseichik52@mail.ru



Владимир Львович Полонский, к.т.н.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812) 552-64-29, e-mail: Vladimir.polonsky@gmail.com.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы прогнозирования изменения прочностных свойств эластомеров, используемых для изготовления резиновых уплотнений в узлах нефтяного оборудования работающих при высоких температурах. Показано, что изменение свойств резинового уплотнения при его длительной эксплуатации (5-10 лет) с высокой вероятностью может быть спрогнозировано по результатам испытаний образцов из данной резины после их кратковременного старения (10-12 дней).

Ключевые слова: прогнозирование, резина, термическое старение, напряжение разрыва, относительное удлинение при разрыве

A.A.Asheichik, V.L.Polonsky

PREDICTION OF CHANGE OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF ELASTOMERS AT THERMAL AGEING

Dr. Anatoly A.Asheichik[1], e-mail: aseichik52@mail.ru
Dr. Vladidir L. Polonsky[1], e-mail: Vladidir.polonsky@gmail.com.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The questions of prediction of change of the strength properties of elastomers, used for producing rubber seal for units of the oil equipment working at high temperatures are considered in the article. It is shown that change of rubber properties of seal at its long operation (5-10 years) with high probability can be predicted by results of the tests of the samples of the given rubber after their

short-term ageing (10-12 days).

Key words: prediction, rubber, thermal ageing, tensile strength, ultimate strain, elongation.

Эластомеры имеют сложнейшую реологию, которая наблюдается в виде процессов релаксации, ползучести, старения и других проявлениях [1,2,3]. Все эти процессы ускоряются при повышенных температурах. Так при старении эластомеров в деформированном состоянии значительно меняются такие физико-механические свойства как: относительная остаточная деформация сжатия, статический модуль, динамический модуль [4,5]. При хранении резинового изделия в недеформированном состоянии изменяются такие свойства как: прочность и относительное удлинение при разрыве и т.п. [6].

Изменение всех этих свойств эластомеров в процессе термического старения описывается зависимостью Аррениуса

$$K(T) = A \cdot e^{-E/RT} \qquad (1)$$

где $K(T)$ – значение свойства эластомера, A – константа, характеризующая данный процесс, E – энергия активации, R – газовая постоянная, T - абсолютная температура.

Использование этой зависимости положено в основу экспериментально-теоретического метода, позволяющего прогнозировать изменение свойств резинового уплотнения при его длительной эксплуатации (5-10 лет) по результатам испытаний образцов из данной резины после их кратковременного старения (10-12 дней) [8].

Задачей данной работы являлась проверка возможности использования резины HNBR фирмы FMC для изготовления неподвижных уплотнений узлов нефтяного оборудования при температуре эксплуатации 150˚C и гарантированном сроке службы 10 лет. Использование метода конечных элементов и программы STAR [4,7] показало, что использование данной резины возможно при минимально предельных значениях после выработки всего срока службы (10 лет) при указанной температуре эксплуатации для напряжения при разрыве $[\sigma_f]$=10,4 МПа, а для относительного удлинения при разрыве $[\varepsilon_f]$= 0,25.

Поставленная задача решалась экспериментальным методом с последующим использованием метода прогнозирования регламентированного ISO 11346 [8], основанного на использовании зависимости Аррениуса. Для определения прочностных характеристик резины напряжения при разрыве σ_f и относительного удлинения при разрыве ε_f использовалась стандартная разрывная машина [6]. Характеристики: разрывное усилие - до 5000 Н, скорость перемещения нижней балки от 5 до 30 мм/мин, термокамера обеспечивает возможность испытаний при температурах от -100 до + 300˚C в различных газовых средах, автоматизированную запись растягивающего усилия и удлинения.

В качестве образцов для испытаний использовались лопатки, выру-

баемые из пластин резины HNBR фирмы FMC. Все измерения проводились после трех циклов тренировки по ISO 2856. На этой же установке проводились испытания образцов резин, подвергнутых старению. В этом случае образцы перед испытаниями помещались в термошкаф, обеспечивающий постоянную температуру старения в диапазоне от 50 до 300˚С с принудительной вентиляцией. Значения σ_f рассчитывались по данным условных напряжений разрыва σ_{eng} полученным в результате экспериментов по формуле [6]

$$\sigma_f = \sigma_{eng}(1+\varepsilon_f) \qquad (2)$$

В табл. 1 и 2 представлены результаты исследования прочностных свойств резины, не подвергавшейся старению (t=0), и резин состаренных различное время при разных температурах. При термостарении образцы резины в виде лопаток нагревались в термошкафу без нагрузки при температуре старения Т = 363, 393, 433 и 473˚К. Продолжительность нагревания составляла t = 10, 24, 80, 300 часов.

Таблица 1

Результаты экспериментального определения напряжения разрыва σ_f резины HNBR после кратковременного старения

T˚K	σ_f, МПа после термостарения в течение t, ч				
	0	10	24	80	300
363	55,6	55,5	54,8	53,5	52,0
393	55,6	54,5	53,4	51,7	48,9
433	55,6	49,5	46,7	41,7	35,6
473	55,6	41,1	36,5	27,2	-

Таблица 2

Результаты экспериментального определения относительного удлинения при разрыве ε_f резины HNBR после кратковременного старения

T˚K	ε_f, МПа после термостарения в течение t, ч				
	0	10	24	80	300
363	1,93	1,89	1,85	1,80	1,72
393	1,93	1,85	1,81	1,73	1,59
433	1,93	1,62	1,49	1,29	1,06
473	1,93	1,29	0,965	0,502	-

По результатам, приведенным в табл. 1 и 2, построены графики, представленные на рис.1 и 2. На рис.1,2 показаны также точки, соответствующие минимальным предельным значениям [σ_f] и [ε_f], для которых предстояло провести прогнозирование свойств резины.

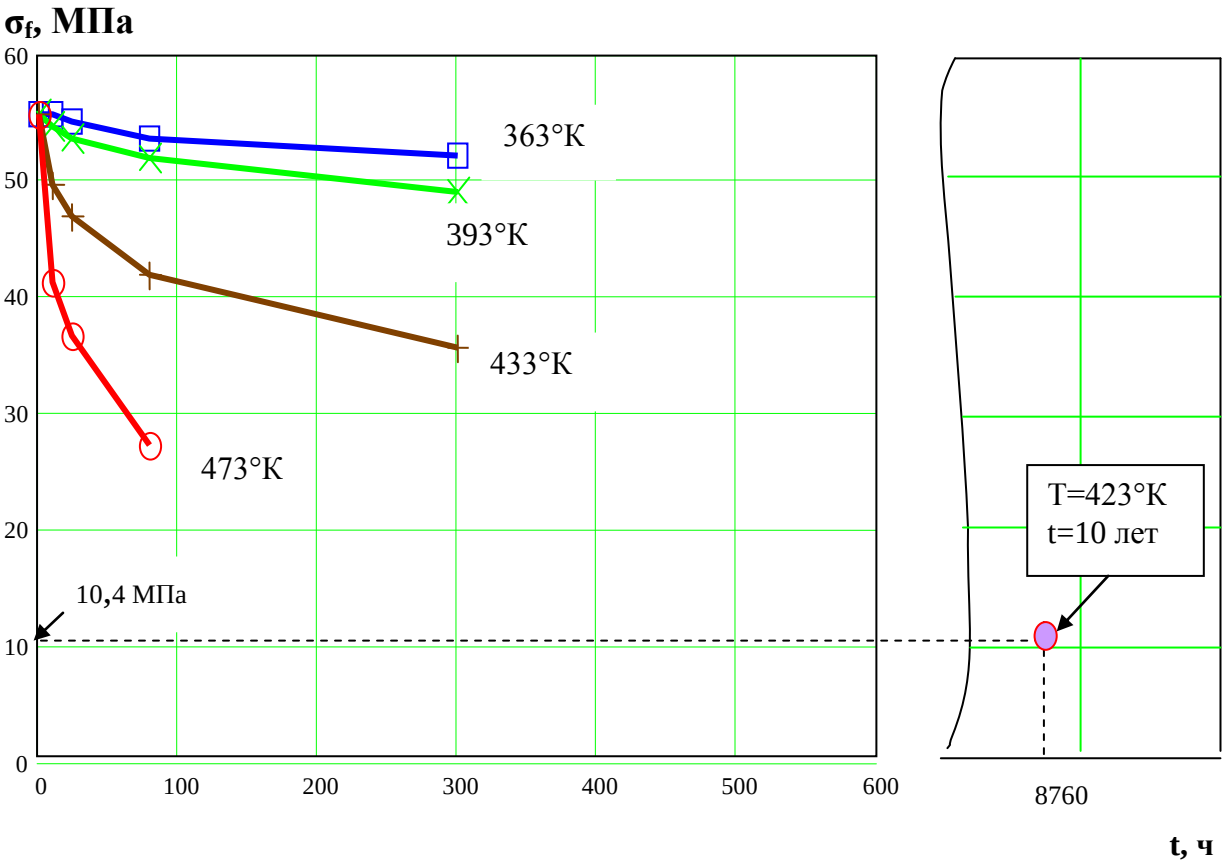


Рис. 1. Изменение напряжения разрыва во времени после кратковременного старения образцов резины HNBR

Как видно из табл. 2,3 и рис. 1,2, прочностные свойства резины постоянно падают как с ростом температуры старения, так и с увеличением времени старения. Однако из анализа графиков, представленных на рис.1,2, следует, что простая экстраполяция на длительные сроки эксплуатации, превышающие время термостарения в экспериментах в 20-30 раз, невозможна.

Для прогнозирования напряжения разрыва состаренной резины HNBR через 5-10 лет на основании рекомендаций изложенных в ISO 11346 зависимости напряжения разрыва от времени при различных температурах были построены в других координатах. По оси ординат откладывалось отношение напряжения разрыва резины после ее термостарения при температуре «Т», обозначенное как σ_{fT}, к напряжению разрыва резины до ее термостарения, обозначенному как σ_{f20}. По оси абсцисс откладывалось время в часах в логарифмическом масштабе. Изменение указанной относитель-

ной характеристики напряжения $\sigma_{fT} / \sigma_{f20}$ во времени при различных температурах приведено на рис. 3.

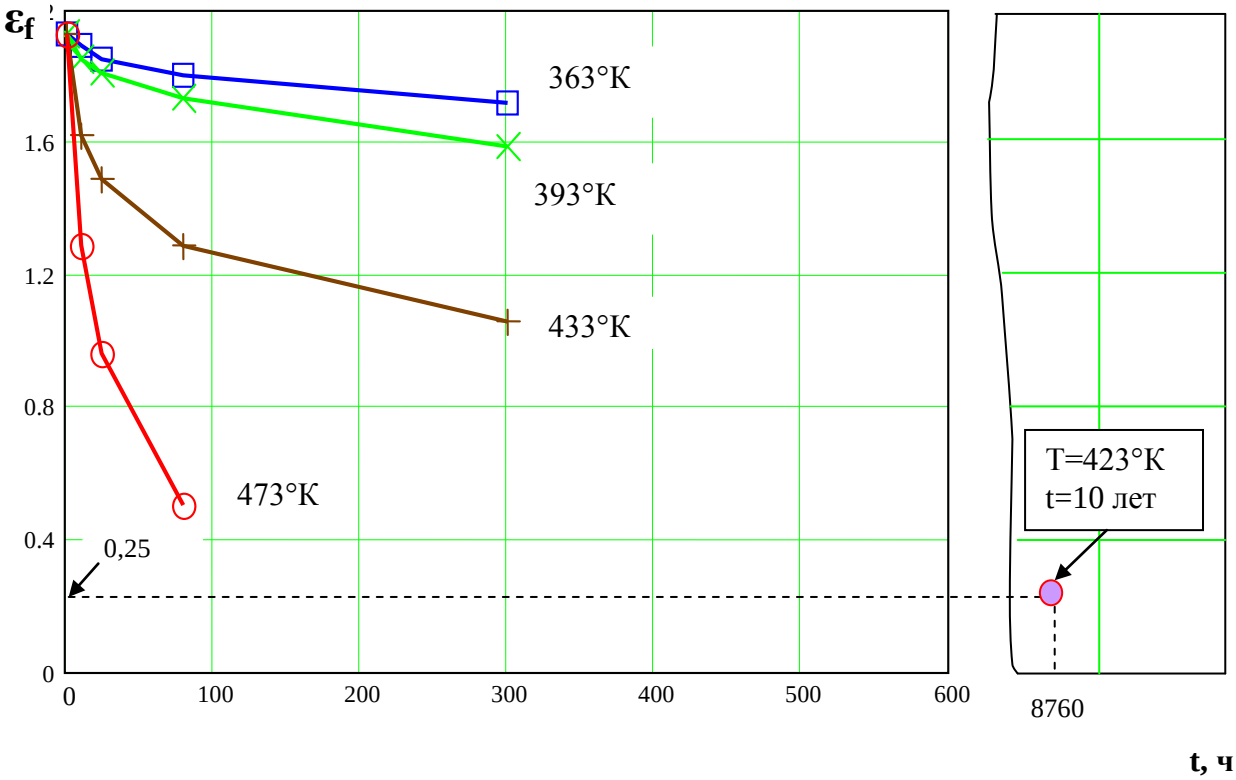


Рис. 2. Изменение относительного удлинения при разрыве во времени после кратковременного старения образцов резины HNBR

На рис. 3 также показано графическое определение времен, через которые происходят уменьшения напряжения разрыва в два раза (уровень 0,5 по оси ординат) при температурах 363, 393, 433, 473ºК. Аналогичные графические построения с использованием рис.3 на уровнях уменьшения напряжений разрыва 0,8; 0,6; 0,4 и 0,3 позволяют получить и на этих уровнях соответствующие времена до достижения уменьшения данной характеристики до указанного уровня.

Следующим этапом для прогнозирования ресурса по напряжению разрыва при использовании методики прогнозирования по ISO 11346 является построение номограммы, приведенной на рис.4. При ее построении используются данные времен достижения уменьшения предельного напряжения до уровней 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3 (по оси ординат на рис.4) и величина $1/T \cdot 10^4$ (по оси абсцисс).

Заключительными этапами прогнозирования ресурса по напряжению разрыва является проведение на номограмме (см. рис.4) вертикальной прямой, соответствующей температуре эксплуатации уплотнения, заданной заказчиком (Т = 423ºК), отсчет по оси ординат значений времени, где эта вертикальная прямая пересекает линии номограммы и последующее построение заключительного графика (рис.5) изменения относительной характеристики напряжения $\sigma_{fT} / \sigma_{f20}$ во времени при температуре 150ºС (Т = 423ºК).

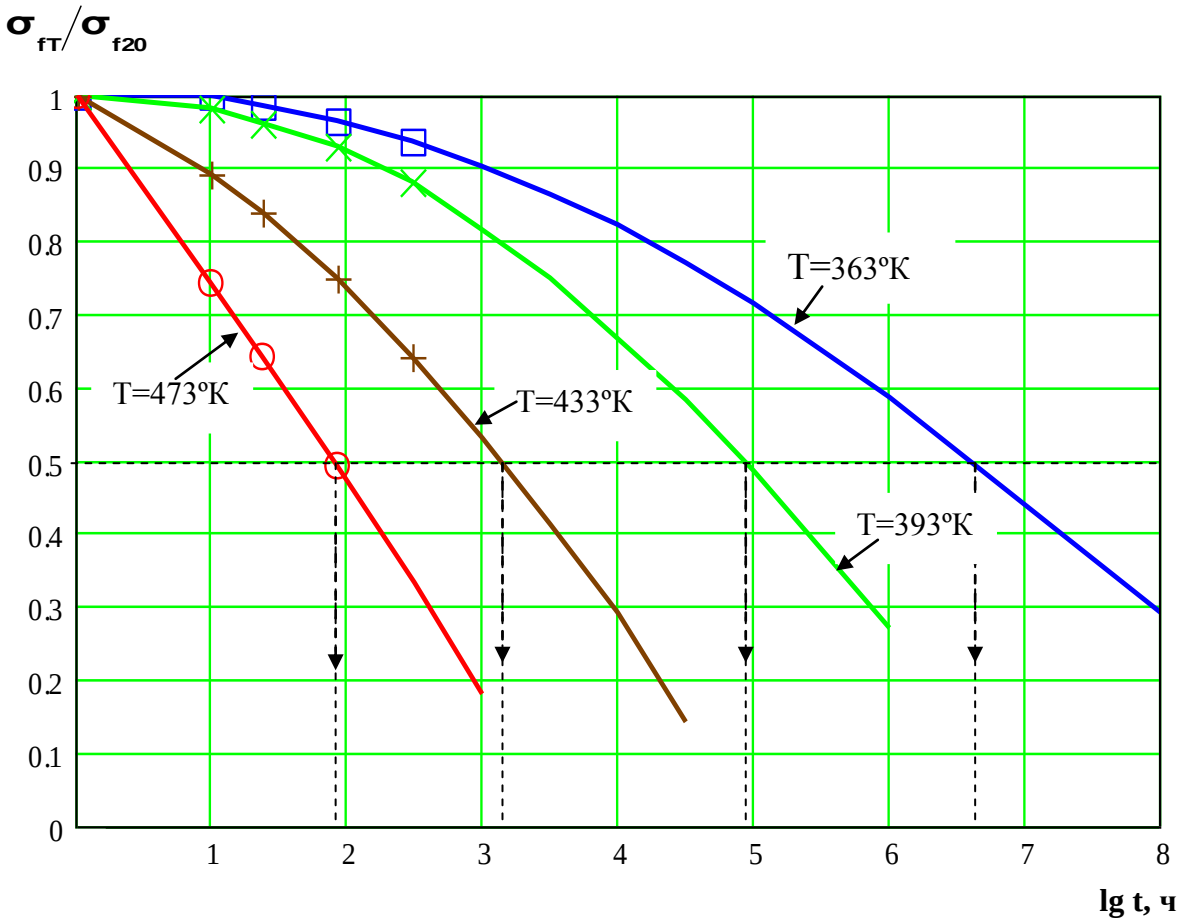


Рис. 3. Изменение относительной характеристики напряжения во времени при различных температурах

После получения заключительного графика изменения относительной характеристики напряжения во времени при заданной температуре эксплуатации (см. рис.5) остается только графически определить значение уровня падения напряжения разрыва при заданном сроке эксплуатации (10 лет). Из рис. 5 следует, что при этом сроке эксплуатации (lg t = 4,94) уровень падения напряжения σ_{fT}/σ_{f20} через 10 лет составит 0,21. Абсолютное значение σ_{fT} при температуре T = 150˚C и сроке эксплуатации t = 10 лет составит σ_{fT} = 11,7 МПа.

Аналогичным образом на основании результатов экспериментов, приведенных табл.2, было проведено прогнозирование изменения относительного удлинения резины HNBR фирмы FMC за срок эксплуатации 10 лет при температуре 150˚C (T = 423˚K). Установлено, что абсолютное значение ε_{fT} при температуре T = 150˚C и сроке эксплуатации t = 10 лет составит ε_{fT} = 0,193.

Таким образом, использования метода прогнозирования по ISO 11346 позволило установить, что резина фирмы FMC при эксплуатации ее в узле нефтяного оборудования при температуре 150˚C в течение 10 лет обеспечит минимальное предельное значение $[\sigma_f]$ = 10,4 МПа с коэффициентом запаса 1,13, однако не обеспечит минимального предельного значения $[\varepsilon_f]$

= 0,25, так как после эксплуатации при указанном сроке службы ε_f составит 0,193.

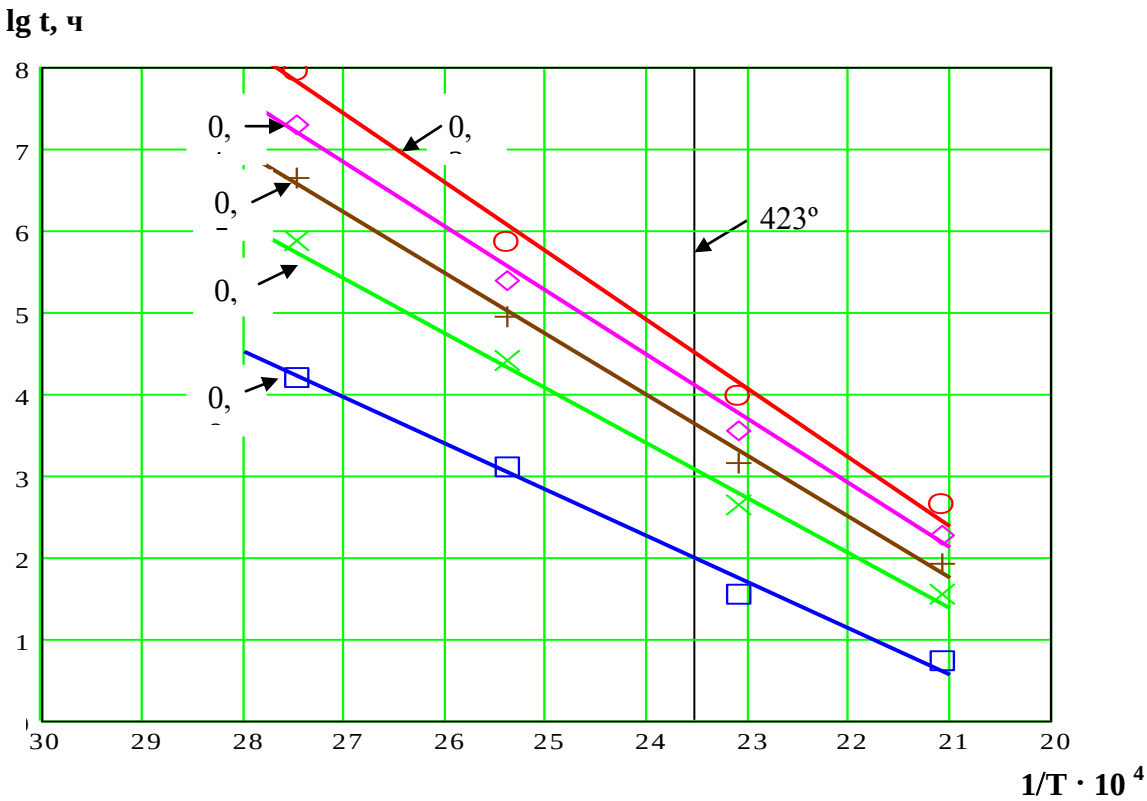


Рис. 4. Номограмма для прогнозирования ресурса по напряжению разрыва

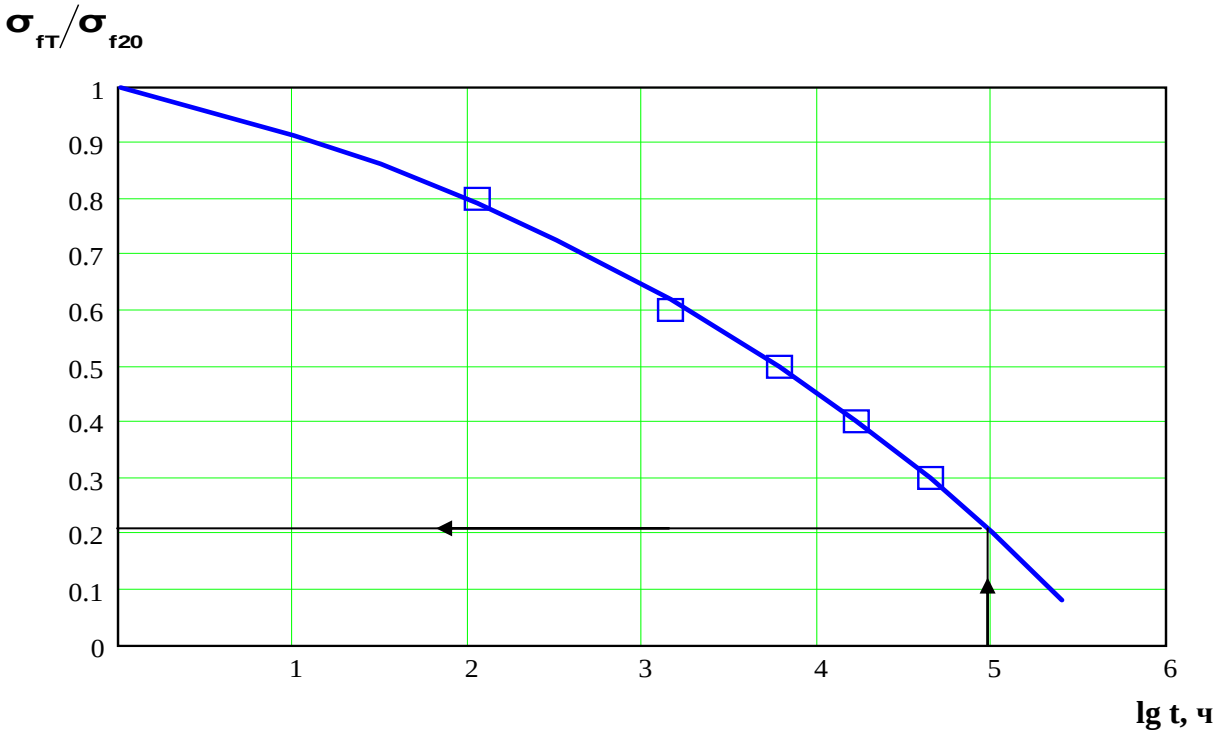


Рис. 5. Прогнозирование напряжения разрыва через 10 лет при температуре 150ºС

Проведенные авторами исследования показали, что изменение свойств резинового уплотнения при его длительной эксплуатации (5-10 лет) с высокой вероятностью может быть спрогнозировано по результатам испытаний образцов из эластомера, использованного для изготовления этого уплотнения, после их кратковременного старения (10-12 дней). Таким образом, длительные дорогостоящие испытания уплотнений нефтяного оборудования в деформированном состоянии могут быть заменены стандартными испытаниями образцов резин после их краткосрочного термостарения в недеформированном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашейчик, А. А. Экспериментальная механика: учебное пособие / А. А. Ашейчик, С.Г.Чулкин – СПб.: изд-во СПбГПУ, 2008.– 107 с.
2. Ашейчик, А. А. Стенд для испытаний материалов на устойчивость к взрывной декомпрессии / А. А. Ашейчик, С.О. Лазарев // XI Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы, Фундаментальные исследования в технических университетах : тезисы докл./ СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006 – С. 291-292.
3. Ашейчик, А. А. О методике испытаний эластомеров на устойчивость к взрывной декомпрессии / А. А. Ашейчик // X Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы, Фундаментальные исследования в технических университетах : тезисы докл. / СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007 – С. 247- 248.
4. Ашейчик, А. А. Вычислительная механика. Расчет деталей машин методом конечных элементов : учебное пособие / А. А. Ашейчик, В. Л. Полонский, С.Г.Чулкин – СПб.: изд-во СПбГПУ, 2011.– 301 с.
5. Ашейчик, А. А. Стенд для исследования динамического модуля и модуля внутреннего трения эластомеров/ А. А. Ашейчик // XIV Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы, Фундаментальные исследования в технических университетах : тезисы докл./ СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010 – С. 140-141.
6. Касем, А. А. Метод оценки работоспособности эластомерных деталей с учетом упругопластических свойств материала : дис. … канд. техн. наук : 05.02.02 : защищена 07.05.2002 / А. А .Касем СПб.: 2002. 136 с.
7. Лазарев, С. О. Вычислительная механика. Часть 2: учебное пособие / С. О. Лазарев, В. Л. Полонский, А. А. Ашейчик. – СПб.: изд-во СПбГПУ, 2007.– 122 с.
8. International standard ISO 11346. Rubber, vulcanized or thermoplastic – Estimation of life-time and maximum temperature of use from an Arrhenius plot. Введен 01.02.2004. ИСО - международные стандарты, 2004. - 16 с.

УДК 621.891:621.892

Е.В. Березина, А.В. Волков, В.А. Годлевский, Д.С. Фомичев

К МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕЗОГЕННОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ



Елена Владимировна Берёзина, д.т.н.,
Ивановский государственный университет,
Россия, г. Иваново
elena_berezina@mail.ru



Алексей Владимирович Волков, к.т.н.,
Ивановский государственный университет
Россия, г. Иваново
volk@ivanovo.ac.ru



Владимир Александрович Годлевский, д.т.н.,
Ивановский государственный университет
Россия г. Иваново
godl@yandex.ru



Дмитрий Сергеевич Фомичёв, к.т.н.,
Ивановский институт государственной противопожарной службы МЧС России, Россия г. Иваново
dsf81@mail.ru

Аннотация

Описаны принципы поляризационной трибометрии и примеры ее приборной реализации. Предложены модели, описывающие реологию тонкого смазочного слоя, указаны возможности учета в этих описаниях оптической анизотропии объекта. Приведены оценочные результаты экспериментов с модельными жидкостями на оригинальном трибометре с вращательной парой трения «плоскость-плоскость» и возможностью регистрации эффекта двулучепреломления.

Ключевые слова: смазочный слой, поляризационный трибометр, анизотропия, мезоген, двулучепреломление.

E.V. Berezina, A.V. Volkov, V.A. Godlevsky, D.S. Fomichev

TO THE TECHNIQUE OF MESOGENE LUBRICATION LAYER'S OPTICAL PROPERTIES RESEARCH

Elena V. Berezina[1], e-mail: elena_berezina@mail.ru
Alexey V. Volkov[1], e-mail: volk@ivanovo.ac.ru
Vladimir A. Godlevsky[1], e-mail: godl@yandex.ru
Dmitry S. Fomichev[2], e-mail: dsf81@mail.ru
[1]Ivanovo State University, Russia
[2]Ivanovo Institute of State Firefighting Service, Russia,

Abstract

The principles of polarizing tribometry and examples of it's instrumental realization were described. Some models describing the rheology of thin lubrication layer were offered. It was specified the possibilities of taking into account the layer's optical anisotropy. Estimating results of experiments conducted on model liquids with help of original tribometer with rotary couple of friction "plane –plane" with possibility of registration of "two-refraction" effect were presented.

Key words: lubricating layer; polarizing tribometer, anisotropy, mesogene, two-refraction.

Поляризационная микроскопия является наиболее распространенным методом исследования фазового состояния соединений, в том числе мезоморфных структур. Она позволяет наблюдать эффекты объемного структурирования и в растворах. Это дает возможность использовать данную методику и для оценки фазового состояния исследуемых смазочных материалов (СМ). Наличие двулучепреломляющих текстур в объеме СМ позволяет предполагать повышенную склонность к самоорганизации граничного смазочного слоя на поверхности. В литературе имеется мало сведений о попытках применения поляризационно-оптических методик к смазочным слоям мезогенной природы, хотя этот подход мог бы существенно прояснить ситуацию со структурообразованием в смазочном слое. В этом направлении необходимо преодолеть трудности как теоретического, так и экспериментального свойства.

Ориентационные эффекты на молекулярном уровне, однако, происходят не только и не столько в силу близости поверхностных атомов, сколько в результате приповерхностного сдвига. Несмотря на рациональную очевидность описанного механизма, экспериментальных доказательств его существования явно недостаточно. В течение последних нескольких десятилетий было выдвинуто немало умозрительных моделей, рисующих картину супрамолекулярного упорядочивания ближайших к твердой поверхности слоев СМ. Особенное разнообразие этих представлений относилось к поверхностно-активным веществам, и вообще к трибоактивным компонентом анизометричной молекулярной структуры. Структурные модели

были представлены как моно-, так и полислоевыми текстурами. Только в последние годы появилась возможность проверять адекватность подобных моделей методами молекулярного моделирования, оценивать возможность существования тех или иных видов молекулярных упаковок.

С тем, чтобы выявлять, каким образом молекулярные ориентационные эффекты влияют на реологические свойства смазочного слоя, были предложены устройства типа «поляризационного трибометра», позволяющие использовать взаимодействие поляризованного луча света со смазочным веществом, в котором происходит сдвиг. Известны попытки получения изображений мезогенного СМ в поляризованном свете при поступательном движении одной поверхности трения относительно другой [1] или при относительном движении поверхностей трения по эллиптической траектории [2].

Установка, базирующаяся на описанном выше принципе и реализующая вращательную схему «диск-диск» где диски взаимодействуют плоскими поверхностями, реализована авторами настоящей статьи. Задачей нашего эксперимента была одновременная регистрация силы трения и оптического сигнала, отражающего анизотропию СМ [3]. В приборе реализована трибометрическая схема, основанная на вращательном движении поверхностей трения, создающая стабильные условия сдвигового процесса для проявления оптических эффектов в смазочном слое. Пара трения представляет собой два оптических окна в форме дисков. Нижний диск неподвижен, верхний приводится во вращение. Образец СМ помещается между стеклами, рабочий зазор регулируется микрометрическим устройством [4].

Исходя из кинематической схемы привода и свойств поверхности стекол, удалось обеспечивать минимальный зазор пары трения не более 30 мкм. Источником светового пучка в оптической части прибора являлся лазер. Поскольку луч лазера по своей природе поляризован, добавление в систему второго, поворотного, поляризатора позволяла при начале эксперимента (когда индуцированная сдвигом анизометрия еще не вызвала анизометрии структуры смазочного слоя) «гасить» световой пучок, как это делается, например, при исследовании мезоморфизма жидких кристаллов. При начале относительного движения пары трения, таким образом, происходила ориентация мезогенных молекул СМ, и на выходе оптической системы появлялся сигнал, отражающий ориентационные процессы.

Попытаемся сформулировать некоторые соображения по поводу того, какую информацию о состоянии смазочного слоя может принести методика, использующая поляризованный свет. Можно считать, что параметр анизотропии мезогенного СМ пропорционален интенсивности светопропускания, которая, в свою очередь, зависит от среднего слоевого напряжения деформации или от крутящего момента в случае вращательного относительного движения поверхностей трения. Поскольку в таком экспери-

менте нельзя измерить крутящий момент в той локальной области, где ведется непосредственное измерение светопропускания, то следует принять, что данный момент пропорционален некоторому усредненному моменту, который и измеряется непосредственно трибометром [6].

Движение жидкости при установившемся течении описывается уравнением Навье-Стокса в цилиндрических координатах, при записи уравнения полагаем, что радиус рабочего диска r, на котором производим измерения, существенно больше средней толщины рабочего зазора h:

$$\Delta v_\varphi = \frac{v_\varphi}{r^2} \quad \text{или} \quad \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_\varphi}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} = \frac{v_\varphi}{r^2} \tag{1}$$

Граничные условия: $z = 0: \; v_\varphi = 0$

$$z = h: \; v_\varphi = \omega r \,,$$

где h – толщина зазора, ω – угловая скорость относительного вращения поверхностей трения; r – радиус, на котором производят измерения, – ненулевая составляющая линейной скорости.

Напряжения деформации в данной системе можно записать как:

$$\begin{cases} \sigma_{\varphi z} = \eta \dfrac{\partial v_\varphi}{\partial z} \\ \sigma_{r\varphi} = \eta\left(\dfrac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \dfrac{v_\varphi}{r}\right) \end{cases}, \; , \tag{2}$$

где η – динамическая вязкость.

Таким образом, решив уравнение (1), и получив значение v_φ можно оценить значения напряжений деформации, а следовательно, и значения интенсивности светопропускания. Это позволяет выйти на параметр анизотропии:

$$A \sim I' \sim \sigma_{r\varphi} \,, \tag{3}$$

где A — параметр порядка мезогенной системы, I' — интенсивность светопропускания; $\sigma_{r\varphi}$ — напряжение сдвига в локальной исследуемой области.

Полезно было бы рассмотреть параметр анизотропии как некую сумму усредненных параметров ориентации отдельных молекул в состоянии покоя и вращательной составляющей анизотропии, зависящей от угловой скорости и радиуса. Хотя мезогенный материал в исходном состоянии будет иметь некоторый начальный (статический) уровень анизотропии, для простоты будем считать анизотропию системы в состоянии покоя равной нулю. Анизотропию, вызванную сдвигом, предположим зависящей от компонентов скоростей (параллельной и перпендикулярной) двулучепреломления и угла между ними, которое, по идее, должно возникать при прохождении плоскополяризованного луча через анизотропную среду. К

сожалению, более подробные теоретические выкладки в данных предположениях представить затруднительно, так как на приборе регистрируется общее значение фототока, нет возможности анализировать отдельно обыкновенный и необыкновенный лучи, возникающие при возможном двулучепреломлении [5].

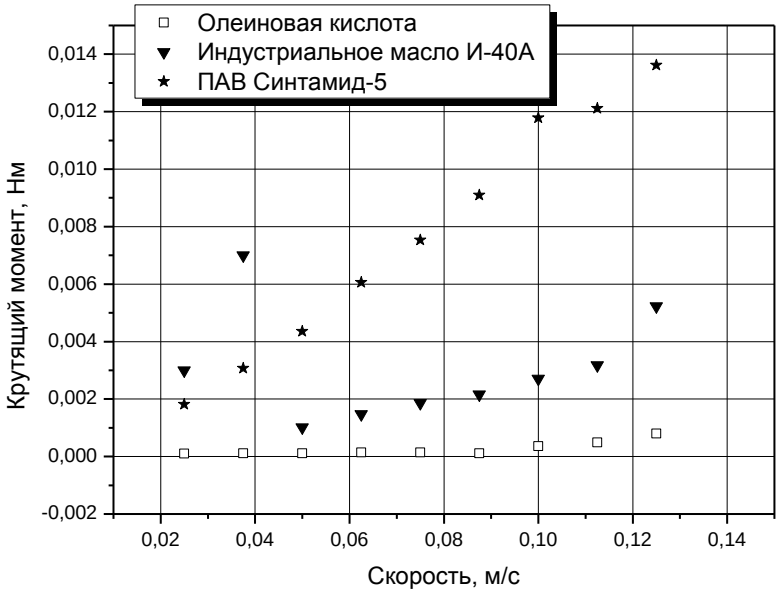


Рис. 1. Зависимость крутящего момента от скорости при исследовании смазочных материалов различной природы

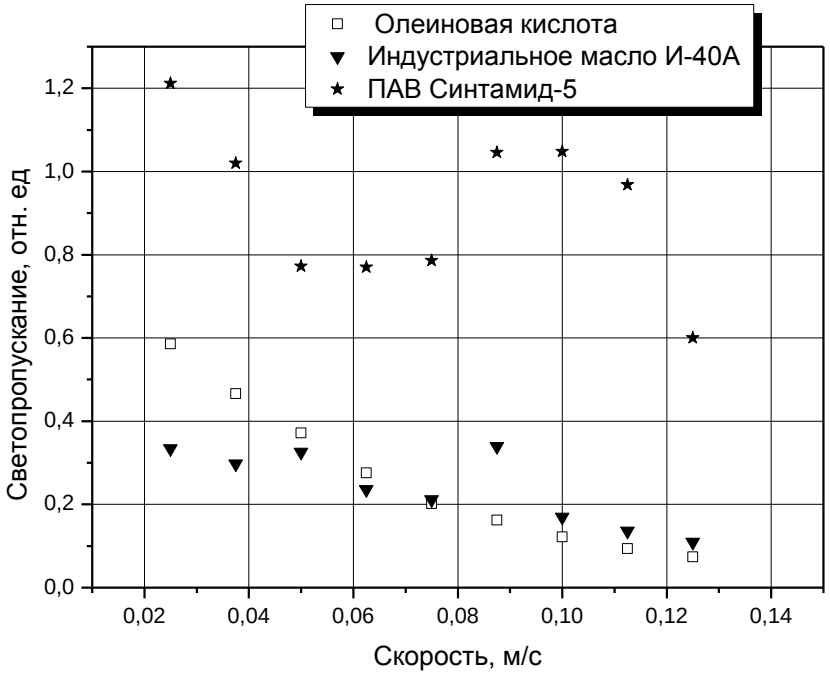


Рис. 2. Изменение светопропускания смазочного слоя от скорости

сдвига при исследовании СМ различной природы

Для отработки методики поляризационной трибометрии была проведена серия экспериментов. В качестве тестовых объектов для испытаний нового прибора использовали два типа жидкотекучих мезогенных СМ — на масляной и водной основе. Это были растворы олеиновой кислоты в минеральном масле и водные растворы неионогенных ПАВ.

Было обнаружено, что для обоих типов модельных СМ характерно изменение фотоответа в зависимости от скорости сдвига и толщины рабочего зазора. Отклонения от ньютоновского типа течения СМ увеличивались при снижении скорости сдвига и уменьшении толщины слоя. Получены свидетельства того, что при остановке сдвига не происходит быстрого возврата трибосистемы к исходному состоянию. Такого рода гистерезис ориентационного эффекта («молекулярная память» о произошедшем сдвиге) может служить одной из дополнительных характеристик «мезогенности» СМ. При испытании разбавленных растворов ряда ионогенных ПАВ фотоответ не был обнаружен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левченко В. А. Нанотрибология // Современная трибология: успехи и перспективы. М. Изд-во ЛКИ, 2008, С. 324–325.
2. Oswald P., Pieranski P. Nematic and cholesteric liquid crystals: concepts and physical properties illustrated by experiments // Taylor anf Francis Group, London, 2005. 618 p.
3. Березина Е.В., Годлевский В.А., Фомичев Д.С., Корсаков М.Н. Установка для исследования оптических свойств смазочного материалов в условиях сдвига // Проблемы машиноведения: Трибология — машиностроению. Тр. Всерросс. науч.-техн. конф. с участием иностр. спец. Москва, 29–31 октября 2012 г. ИМАШ РАН. Т.1. С. 238–241.
4. Березина Е.В., Годлевский В.А., Корсаков М.Н., Сандлер В.А. Поляризационный трибометр // Тез. Докл. Междунар. НТК «Полимерные композиты и трибология» - ПОЛИКОМТРИБ-2011. Гомель. Беларусь..27-30 Июня 2011 г. Электр. ресурс.
5. Вукс М.Ф. Электрические и оптические свойства молекул и конденсированных сред: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1984. 334 с
6. Годлевский В.А., Берёзина Е.А., Корсаков М.Н., Фомичев Д.С. Трибометрия с регистрацией оптических свойств мезогенного смазочного слоя // Техника и технологии трибологических исследований. Трибология и проблемы МЧС РФ. Тезисы докладов III международного семинара, Иваново, 18 — 19 октября 2012 г., С. 12.

УДК 621.891

А. Д. Бреки

О ПРОЦЕССАХ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ



Бреки Александр Джалюльевич, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией по основам трения и смазки кафедры МиОК СПбГПУ, с.н.с. лаборатории «Механика управляемых систем» ИПМаш РАН.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-64-29, e-mail: albreki@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы образования и взаимодействия дисперсных компонентов смазочного слоя, возникающего в узлах трения управляемых систем. Представлена классификация дисперсных компонентов смазочного слоя в случае использования нефтяных смазочных масел для смазки трибосопряжений. Приведены соотношения, выражающие кинетику изменения объёмов дисперсных компонентов смазочного слоя.

Ключевые слова: дисперсные компоненты, нефтяное смазочное масло, смазочный слой, узел трения, управляемые системы.

A.D. Breki

ABOUT THE PROCESS OF FORMATION AND INTERACTION OF DISPERSED COMPONENTS LUBRICANT LAYER IN FRICTION CONTROLLED SYSTEMS

Alexander D. Breki, St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
e-mail: albreki@yandex.ru.

Abstract

The paper deals with the formation and interaction of dispersed components of lubricating layer formed in the friction control systems. The classification of dispersed components of the lubricant layer in the case of petroleum lubricating oils to lubricate friction units. Shows the ratio expressing the kinetics of volumes of dispersed components of the lubricant layer.

Key words: dispersed components, petroleum lubricating oil, lubricating layer friction unit, control systems.

Дисперсные компоненты в нефтяных смазочных маслах, используемых в узлах трения управляемых систем, по форме возникновения можно разделить на три основных вида:

1) дисперсные компоненты, генерируемые в процессе трения и окисления масел (частицы износа: металла, окислов; выкристаллизованные при понижении температуры парафины и церезины; частицы нагара, золы, лаков; пузырьки газов, образовавшихся в узле и из компонентов узла (особенно при срабатывании противопенных присадок) и т.д.);

2) дисперсные компоненты, попадающие в узел трения извне естественным образом при обмене веществом и энергией с внешней средой (частицы пыли, песка, резины (при износе уплотнений); частицы воды или другой жидкости, случайно попавшей в систему; пузырьки газов; микроорганизмы);

3) дисперсные компоненты, целенаправленно добавляемые в узел трения, для улучшения триботехнических свойств масел (частицы твёрдых смазочных материалов, металлов, бинарных сплавов и т.д.).

Схема классификации дисперсных компонентов приведена на рис. 1.

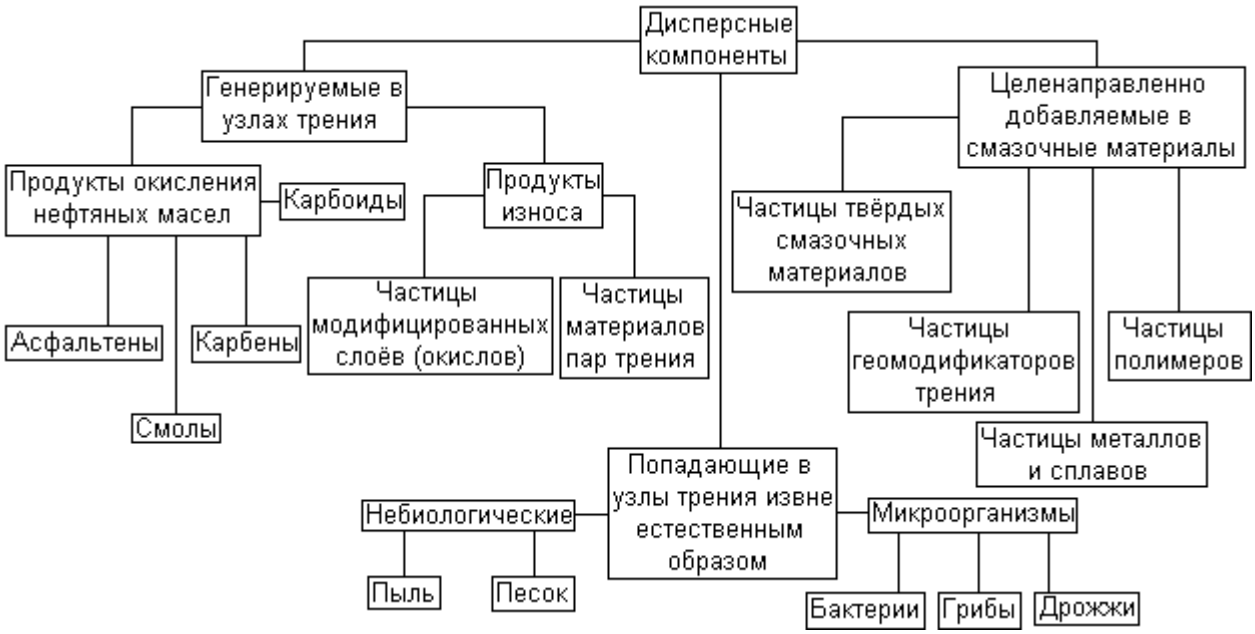


Рис. 1. Классификация дисперсных компонентов в нефтяных маслах

Процесс образования дисперсных компонентов в смазочном слое зависит от большого количества факторов, которые многократно упоминаются в публикациях по трибологии. Вместе с тем, существуют простые соотношения, выражающие изменения объёмов дисперсных компонентов в зависимости от времени при различных комплексах условий.

В частности зависимость объёмного износа от времени для ряда известных на практике случаев можно представить в следующем виде [1]:

$$V_u = k_u \cdot t^n. \qquad (1)$$

где k_u, n – константы, зависящие от эксперимента; V_u – объёмный износ (суммарный объём частиц износа, который и является объёмом данного дисперсного компонента смазочного слоя), t – время.

Для дисперсных компонентов биологического типа (бактерии, грибы, дрожжи) может быть справедлива классическая модель математической экологии – логистическое уравнение, предложенное Ферхюльстом [2]:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{N}{K}\right), \tag{2}$$

где N – численность популяции, r – мальтузианский параметр, характеризующий скорость роста (размножения), K – предельная численность популяции.

Общее решение уравнения (2) имеет вид:

$$\frac{N}{K - N} = C \cdot e^{rt}.$$

Находя константу интегрирования, при условии $N(t = 0) = N_0$ получают:

$$N(t) = \frac{N_0 \cdot K \cdot \exp(r \cdot t)}{K - N_0 + N_0 \cdot \exp(r \cdot t)}. \tag{3}$$

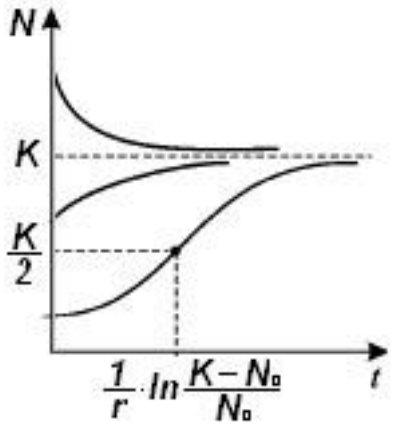


Рис. 2. Динамика численности в модели (3)

График функции (3) при разных начальных значениях численности популяции представлен на рис.2 (по данным Г.Ю. Ризниченко).

Если начальное значение $N_0 < K/2$, то кривая роста имеет точку перегиба. Если $N_0 > K$, то численность со временем убывает.

Умножая правую и левую часть соотношения (3) и, далее, числитель и знаменатель правой части на объём одного микроорганизма $V_{(1)}$ (микроорганизмы одного и того же объёма), имеем соотношение:

$$V_N(t) = \frac{V_{N0} \cdot V_K \cdot \exp(r \cdot t)}{V_K - V_{N0} + V_{N0} \cdot \exp(r \cdot t)}, \tag{4}$$

где V_N – объём популяции, V_{N0} – начальный объём популяции, V_K – предельный объём популяции.

На основании данных из химмотологии [3] установлено, что измене-

ние объёма смолисто-асфальтеновых соединений может быть описано уравнением, аналогичным уравнению Ферхюльста:

$$\frac{dV_a}{dt} = r_a \cdot V_a \cdot \left(1 - \frac{V_a}{V_{Ka}}\right), \; V_{a0} < \frac{V_{Ka}}{2},$$

где V_a – объём смолисто-асфальтеновых соединений в масле; t – время; r_a – константа собственной скорости образования дисперсных смолисто-асфальтеновых соединений; V_{Ka} – предельный объём смолисто-асфальтеновых соединений в масле.

Аналитическое решение уравнения при начальных условиях $V_a = V_{a0}$ (V_{a0} – начальный объём САВ), если $t = 0$ (начальный момент времени):

$$V_a(t) = \frac{V_{a0} \cdot V_{Ka} \cdot \exp(r_a \cdot t)}{V_{Ka} - V_{a0} + V_{a0} \cdot \exp(r_a \cdot t)}, \; V_{a0} < \frac{V_{Ka}}{2}.$$

Для целенаправленно вводимых дисперсных добавок, закономерности изменения объёма весьма неоднозначны и могут выражаться рядом эмпирических уравнений. Вместе с тем, для систем, содержащих частицы различных размеров, при седиментации крупных и диффузии малых частиц также может быть справедливо уравнение Ферхюльста:

$$\frac{dV_{np}}{dt} = r_{np} \cdot V_{np} \cdot \left(1 - \frac{V_{np}}{V_{Knn}}\right), \; V_{np0} > V_{Knn},$$

где V_{np} – объём дисперсной добавки; t – время; r_{np} – константа; V_{Knn} – предельный объём дисперсной добавки в объёме масла (минимальный при данных условиях для данного трибосопряжения).

Решение уравнения при начальных условиях $V_{np} = V_{np0}$, если $t = 0$:

$$V_{np}(t) = \frac{V_{np0} \cdot V_{Knn} \cdot \exp(r_{np} \cdot t)}{V_{Knn} - V_{np0} + V_{np0} \cdot \exp(r_{np} \cdot t)}, \; V_{np0} > V_{Knn},$$

где V_{np0} – начальный объём дисперсной добавки в масле.

Известно, что при наличии в дисперсионной среде двух и более дисперсных компонентов может происходить их взаимодействие различной направленности. При этом динамика изменения количества частиц каждого дисперсного компонента меняется.

В частности, при добавлении в масло дисперсной добавки происходит подавление численности частиц износа.При этом произойдёт смещение кривой объёмного износа вниз (рис. 3). В этом случае, согласно сведениям из химмотологии, произойдёт подавление роста числа частиц смолисто-асфальтеновых соединений (рис. 4), поскольку частицы износа, как и сам процесс трения в ряде случаев интенсифицируют процессы окисления. Вместе с тем, при малом объёмном износе сами частицы могут интенсифицировать окисление незначительным образом.

Ещё одной разновидностью дисперсных компонентов, попадающих в узлы трения из внешней среды, является пыль. Известно [4], что в пыли содержится до 82% кварца и корунда. Данные вещества имеют высокую твёрдость и вызывают абразивное изнашивание трущихся деталей.

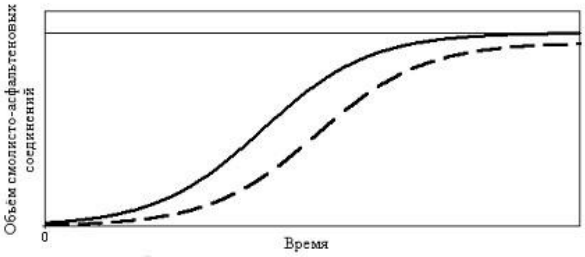


Рис. 4. Подавление продуктов окисления

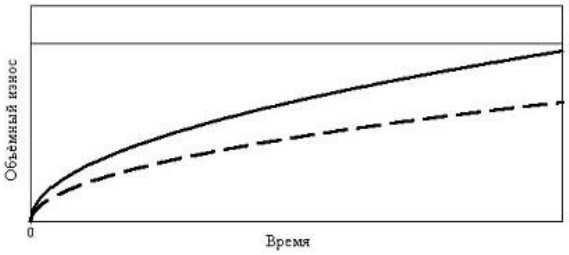


Рис. 3. Смещение вниз кривой износа при введении дисперсной добавки

При износе уплотнений и других вариантах нарушения герметичности узлов трения машин, пыль проникает в зазоры сопряжений и непосредственно влияет на износ сопрягаемых деталей. Степень влияния зависит от минералогического состава, размера и формы частиц пыли. В зависимости от расстояния от почвы до поверхностей узлов трения пыль может содержать в различных процентных соотношениях двуокись кремния, окиси алюминия, кальция, железа и карбонатов различных элементов. В результате, такой дисперсный компонент как пыль будет интенсифицировать образование частиц износа и частиц продуктов окисления при определённых комплексах условий.

Таким образом, изменение объёма одного дисперсного компонента при наличии другого может быть описано в общем виде уравнением:

$$V_{ДК1} = k_{П}(V_{ДК2}, D_{ДК2},...) \cdot f(t),$$

где $k_{П}$ – коэффициент подавления, учитывающий действие одного дисперсного компонента на другой и зависящий от объёма и дисперсности второго компонента и других факторов. В случае подавления роста количества частиц $0 < k_{П} < 1$, в случае нейтралитета во взаимодействии $k_{П} = 1$, в случае стимуляции роста количества частиц справедливо неравенство $k_{П} > 1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию [Текст]/ М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
2. Ризниченко Г.Ю. Лекции по математическим моделям в биологии. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 232 с.
3.Теоретические основы химмотологии [Текст] / под ред. А.А. Браткова. – М.: Химия, 1985. – 320 с.
4.Икрамов У.А. Расчётные методы оценки абразивного износа [Текст] / У.А. Икрамов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

УДК 621.891

А. Д. Breki

ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ С ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ



Breki Александр Джалюльевич, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией по основам трения и смазки кафедры МиОК СПбГПУ, с.н.с. лаборатории «Механика управляемых систем» ИПМаш РАН.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-64-29, e-mail: albreki@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы выбора смазочных композиций, с дисперсными добавками для подшипниковых узлов управляемых систем. От качества функционирования данных узлов существенным образом зависит качество процесса управления, при этом смазочный материал, как неотъемлемый элемент узла, играет фундаментальную роль.

Систематизированы основные принципы и правила, необходимые для корректного подбора смазочных материалов, организации научно-исследовательского процесса по поиску оптимальных для практических требований композиций.

Ключевые слова: дисперсные добавки, смазочное масло, принципы выбора, подшипниковый узел, управляемые системы.

A.D. Breki

PRINCIPLES FOR THE SELECTION OF EFFECTIVE LUBRICATING OILS CONTAINING POWDER ADDITIVES FOR BEARING UNITS MANAGED SYSTEMS

Alexander D. Breki, St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
e-mail: albreki@yandex.ru.

Abstract

The paper deals with the choice of lubricating compositions, powder additives for bearing units managed systems. From the quality of the functioning of these units depends significantly on the quality control process, and the lubricant, as an integral part of the host plays a fundamental role.

Systematized the basic principles and rules necessary for the proper selec-

tion of lubricants, the organization of scientific research process to find the optimum for the practical demands of compositions.

Key words: dispersion additives, lubricating oil, the principles of choice, bearing assembly, control systems.

Смазочные композиции для подшипниковых узлов управляемых систем различного технического назначения с одинаковыми дисперсионными средами, вязкостью и одинаковой дисперсностью твёрдых добавок, но отличающиеся природой этих добавок ведут себя различным образом в идентичных условиях эксплуатации. Это же относится и к жидким смазочным композициям с разными дисперсионными средами и одинаковыми дисперсными компонентами.

При выборе эффективного смазочного масла с дисперсной твёрдой добавкой для подшипниковых узлов объектов управления необходимо придерживаться следующих основных принципов:

1.Предварительно выбор эффективного смазочного масла производить в зависимости от соотношения скорости относительного перемещения трущихся тел и нормального давления на узел трения (рис. 1).

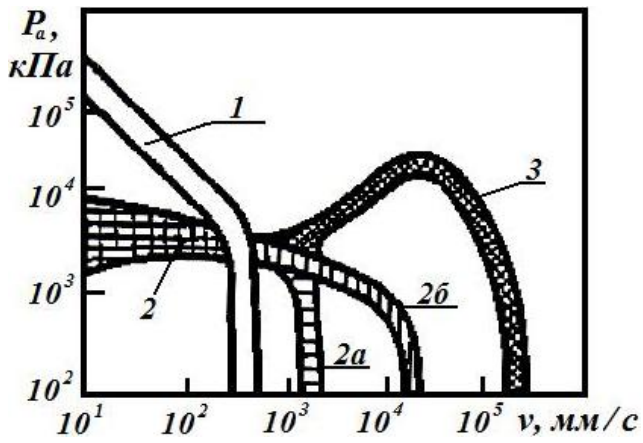


Рис. 1. Выбор по А.Р. Лансдауну. Предельные значения скорости относительного перемещения трущихся тел и нормального давления в контакте для подшипниковых узлов при использовании различных типов смазочных материалов: 1-ТСМ; 2-ПСМ; 2а - для подшипников скольжения; 2б - для подшипников качения; 3 - смазочные масла [1].

Для более детального выбора следует учитывать, что смазка в подшипниковых узлах вообще и в узлах управляемых систем в частности имеет следующие назначения [7]:

-уменьшение трения, возникающего между поверхностями качения, между телами качения и сепаратором, между бортами колец и торцами роликов, а также возникающего вследствие упругих деформаций в точках контакта колец и тел качения под действием нагрузки;

-отвод тепла, развивающегося вследствие работы трения; равномерное распределение тепла во всех частях подшипника;

-предотвращение образования коррозии на поверхностях деталей подшипников;

-заполнение зазоров между неподвижными и вращающимися деталями уплотняющих устройств и предотвращение проникновения в подшипниковый узел пыли, влаги, газов и других посторонних веществ;

-уменьшение шума при работе подшипников;

-уменьшение трения скольжения, возникающего при осевом перемещении наружного или внутреннего колец вдоль посадочного места при регулировании осевой игры в подшипнике, а также при температурных удлинениях вала;

-поглощение импульса мгновенно приложенной силы вследствие упругих свойств масляной подушки, деформация которой поглощает часть энергии удара.

Жидкие смазочные материалы, используемые для смазки подшипников качения должны удовлетворять следующим требованиям [6, 7 и др.]:

- обладать химической и физической стабильностью (не должны интенсивно окисляться и затвердевать);

- не содержать механических примесей (грязь, песок);

- обладать минимальным внутренним трением во избежание значительных энергетических потерь при перемешивании смазочного материала в узле в процессе работы;

- обладать относительно постоянной вязкостью при изменении температурного режима работы подшипникового узла;

- не содержать свободной воды, кислот и других вызывающих коррозию примесей в количествах, превышающих нормы, установленные соответствующими стандартами.

Известно также, что при выборе смазочного материала для подшипникового узла необходимо учитывать следующие факторы [6]:

-размеры подшипника и частоту его вращения. Для подшипников, работающих при окружных скоростях до 4 – 5 *м/с*, можно применять как жидкие, так и пластичные смазочные материалы. При больших окружных скоростях рекомендуются жидкие смазочные материалы. Чем выше окружная скорость, тем меньше должна быть вязкость жидкого смазочного материала;

-величину нагрузки, действующей на подшипник. Устойчивость (прочность) масляной плёнки минеральных масел повышается с увеличением их вязкости. Поэтому, чем выше нагрузка, тем большей вязкостью должны обладать применяемые масла;

-рабочую температуру подшипникового узла. Вязкость смазочных материалов с повышением температуры понижается. Для подшипников, работающих при низких температурах (ниже 0 ^0C), следует выбирать жидкие смазочные материалы с точкой застывания на 15 – 20 ^0C ниже рабочей температуры и с минимальной вязкостью. Для подшипников, при 70–80 ^0C, жидкие смазочные материалы должны обладать повышенной вязкостью. Для подшипников, работающих при температуре выше 70–80 ^{0}C, следует

применять жидкие смазочные материалы с наибольшей вязкостью;

-вязкость минеральных масел для подшипников качения управляемых систем можно устанавливать также по номограмме [6] (рис. 2).

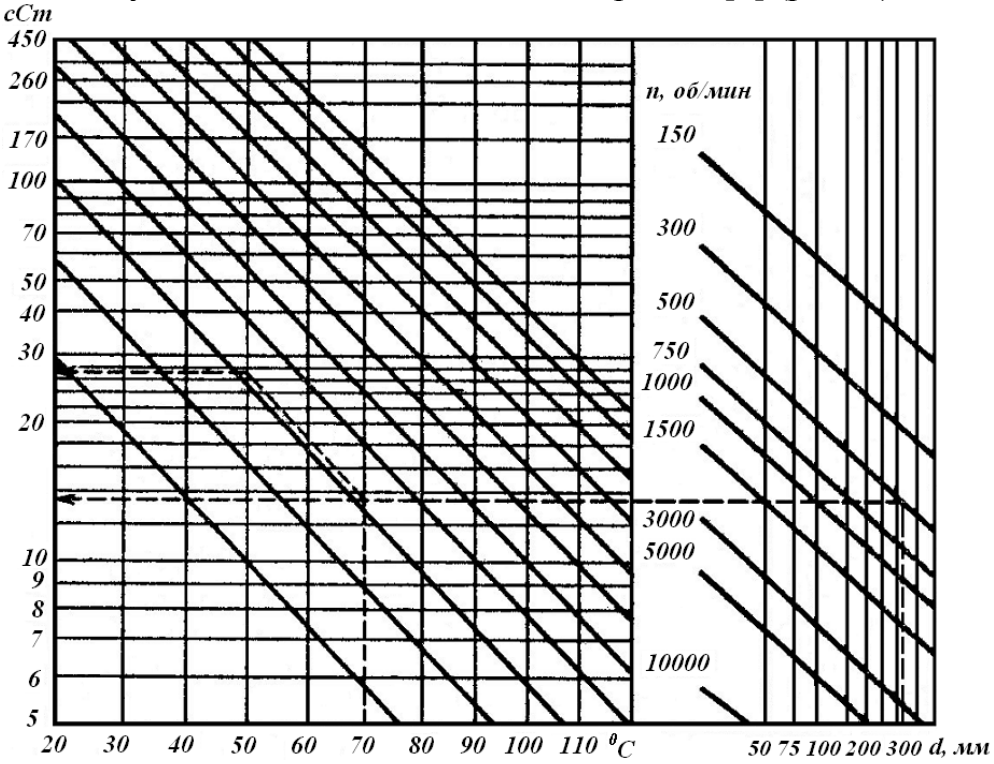


Рис. 2. Номограмма для выбора вязкости минерального масла при заданных размерах и скорости вращения подшипника[6]

Например, для подшипника с диаметром отверстия $d = 340 мм$, при частоте вращения $n = 500 мин^{-1}$ минимальная допустимая вязкость смазочного материала в рабочем состоянии $\nu = 13{,}2 сСт$ (горизонтальная пунктирная линия). При рабочей температуре в узле $70^0 С$ вязкость масла должна быть $\nu = 27 сСт$ при $50^0 С$ (ломаная пунктирная линия). Вместе с тем, в ряде случаев, такой выбор может быть не всегда корректен и требуется экспериментальная оптимизация вязкости;

-состояние окружающей среды. Для подшипников, работающих в среде, загрязнённой вредными газами, парами и другими веществами, рекомендуется использовать пластичные смазочные материалы, учитывая при этом влияние окружной скорости, температуры и др.

2.В ряде случаев, подшипниковый узел управляемой системы должен быть закрытым, иметь свою систему смазки.

3.Не целесообразно использовать дисперсные добавки в системах с фильтрами тонкой очистки, поскольку они могут забиваться и неполноценно выполнять функции по фильтрации возникающих в системе вредных примесей.

4.Необходимо определять предельные условия работы трибосопряжения, соответственно и смазочного масла.

5.На основании априорной информации подобрать для исследования ряд смазочных масел, рекомендуемых для условий работы, оговоренных в пункте 4.

6.Реализовать выбор дисперсных добавок для расширения области контактных давлений (рис. 2). Это особенно важно в условиях инновационного развития экономики, при котором имеются тенденции интенсификации нагрузок и скоростей в современных машинах.

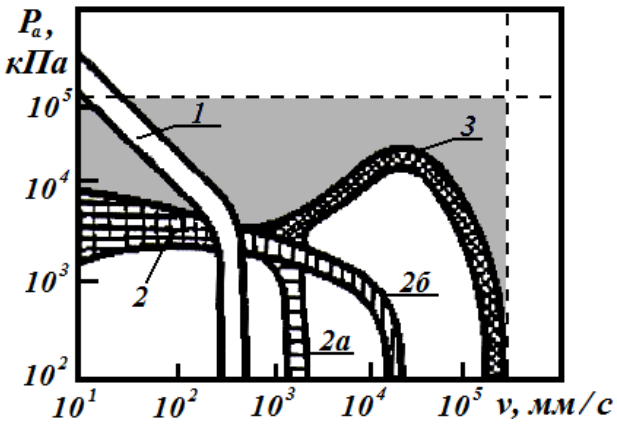


Рис.3. Расширение области контактных давлений при использовании дисперсных добавок

При этом выбор дисперсных компонентов может быть осуществлён в сфере веществ, которые зарекомендовали себя в качестве твёрдых антифрикционных и противоизносных материалов. Хорошими твёрдыми смазочными материалами, имеющими слоистую структуру, являются такие вещества, как графит, дисульфид молибдена, тетраборат натрия, хлорид кадмия, нитрид бора, иодид свинца, хлорид кобальта, сульфат серебра и стеарат цинка. В присутствии влаги воздуха иодид снижает трение. Возможно также использование сульфидов тяжёлых металлов, селенидов и теллуридов [2]: $MoSe_2$, WSe_2, WS_2, MSe_2, NbS_2, $NbSe_2$, TaS_2, $TaSe_2$, $AsSbS_4$ и $AsAsS_4$. В большинстве случаев они имеют слоистую гексагональную структуру, хорошие антиокислительную и химическую стабильность и электропроводимость и применяются в виде порошков, суспензий, золей и антифрикционных лаковых покрытий.

7.Осуществить выбор дисперсности твёрдых добавок с использованием следующего неравенства[3]:

$$r < \sqrt[5]{\frac{27 \cdot k \cdot T \cdot \mu_{дс}}{4 \cdot \pi \cdot g^2 \cdot (\rho_{дф} - \rho_{дс})^2 \cdot t}},$$

где r – радиус частицы дисперсной добавки, $k = R / N_A = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\, Дж / K$ – константа Больцмана, $T(K)$ – абсолютная температурой системы, $\mu_{дс}$ – динамическая вязкость жидкого смазочного материала, g – ускорение свободного падения, $\rho_{дф}, \rho_{дс}$ – плотность частиц дисперсной добавки и жидкого смазочного материала соответственно, t – время. Данный обоснован-

ный выбор необходим с точки зрения обеспечения кинетической устойчивости полученной смазочной композиции как дисперсной системы.

8.Оценить агрегативную устойчивость смазочных композиций. Для коллоидных систем специфична агрегативная неустойчивость, так как лиофобные системы обладают большим запасом свободной энергии на границе раздела фаз, поэтому всегда возможен процесс агрегации (слипания) частиц и уменьшение общей поверхности дисперсной фазы. Для придания агрегативной устойчивости требуется введение стабилизатора[4]. Само введение дополнительных стабилизаторов – процесс сложный, в связи с наличием базового пакета присадок в масле, и требует дополнительных исследований на совместимость.

8.Разработать методику исследования, в том числе подобрать необходимые машины трения для проведения триботехнических испытаний.

9.Произвести оценку эффективности применения исследуемых смазочных масел для конкретных пар трения, работающих в определённых условиях эксплуатации.

10. Осуществить оценку взаимодействия и взаимовлияния дисперсной добавки и пакета присадок смазочного масла. Оценить экологические показатели.

11.Произвести оценку эффективности применения исследуемых смазочных масел, содержащих дисперсные добавки, для конкретных пар трения, работающих в определённых условиях эксплуатации. Реализовать выбор наилучших твёрдых добавок в данных условиях. Оптимизировать концентрацию и дисперсность твёрдых добавок.

12.Произвести стендовые и эксплуатационные испытания для полной оценки влияния дисперсионных сред и смазочных композиций на трение и изнашивание подшипниковых узлов управляемых систем, в том числе оценить состояние смазочных композиций в данных узлах, например, по тепловыделению[5].

Из приведённых данных следует, что:

- оптимального сочетания различных дисперсных компонентов с различными смазочными маслами в конкретных условиях применения можно добиться только посредством проведения многочисленных экспериментальных исследований различной направленности;

- для конкретных условий эксплуатации может быть получено несколько смазочных композиций различного состава, но близких по своим эксплуатационным свойствам;

- если выбор дисперсных компонентов осуществлён в сфере веществ, которые ещё не зарекомендовали себя в качестве твёрдых антифрикционных и противоизносных материалов, то требуются дополнительные исследования по выявлению их свойств и целесообразности их использования в узлах трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

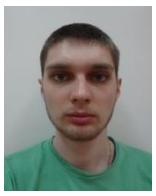
1.Основы трибологии (трение, износ, смазка) [Текст] / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. Изд-е 2-е. – М.: Машиностроение, 2001. – 663 с.
2.Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты.: пер. с англ.; под ред. Ю.С. Заславского [Текст] / Д. Кламанн. – М.: Химия, 1988. – 488 с.
3.Бреки А.Д. Выбор дисперсности твёрдого наполнителя для жидкого смазочного материала [Текст] / А.Д. Бреки // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». / Под. ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 207 – 211.
4.Волков В.А. «Коллоидная химия». – М. МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001, - 640 с.
5.Бреки А.Д. Оценка состояния нефтяного смазочного масла в подшипниковых узлах по тепловыделению [Текст] / А.Д. Бреки // Материалы международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – 14 – 15 июня 2011. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 163 – 166.
6.Бейзельман Р.Д. Подшипники качения. Справочник. Изд. 6-е, перераб. и доп. [Текст] / Р.Д. Бейзельман, Б.В. Цыпкин, Л.Я. Перель. – М.: Машиностроение, 1975. – 575 с.
7.Биргер И.А. Расчёт на прочность деталей машин: справочное пособие; изд. 2-е, испр. и доп. [Текст] / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1966. – 616 с.

УДК 621.91:621.9.08

Е.Ю. Васильев, С.В. Осипчук, К.П. Помпеев, С.Д. Третьяков,
Е.И. Яблочников

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ ЛИТЬЕВЫХ ФОРМ


Евгений Юрьевич Васильев, аспирант
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79213296256, E-mail: vasiliev.e.ju@yandex.ru


Сергей Валерьевич Осипчук, магистрант
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79500109545, E-mail: sergey.osipchuk@gmail.com


Кирилл Павлович Помпеев, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110108265, E-mail: kirpom@rambler.ru


Сергей Дмитриевич Третьяков, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79117495573, E-mail: tretiacov@gmail.com


Евгений Иванович Яблочников, к.т.н., доцент, зав.каф. ТПС
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79219476312, E-mail: eugeny@beepitron.com

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы разработки конструкции и изготовления формообразующих деталей литьевых форм инжекционного литья полимерной оптики. Описана методика проведения экспериментов, результаты которых показали, что на производительность процесса обработки существенно влияет стратегия фрезерования, а на качество обработанных функциональных поверхностей в равной степени влияют и стратегия фре-

зерования и параметры резания. Описана технологическая цепочка проектирования, изготовления и контроля формообразующих деталей, выстроенная на основе современного программного обеспечения и оборудования.

Ключевые слова: формообразующие детали, групповая литьевая форма, термопластичные полимерные материалы, полимерные оптические детали, CAD/CAM-системы, 3D-модель, прецизионный фрезерный обрабатывающий центр, микрофрезерование, обеспечение качества, контроль точности, координатно-измерительная машина, контроль шероховатости поверхностей, профилометр.

E.J.Vasilev, S.V.Osipchuk, K.P.Pompeev,
S.D.Tretiakov, E.I.Yablochnikov

APPLICATION OF MODERN TECHNOLOGICAL EQUIPMENT AND SOFTWARE FOR THE MANUFACTURING AND MEASURING MOLD INSERTS

Eugeny J. Vasilev[1], e-mail: vasiliev.e.ju@yandex.ru;
Sergei V. Osipchuk[1], e-mail: sergey.osipchuk@gmail.com;
Dr. Kirill P. Pompeev[1], e-mail: kirpom@rambler.ru;
Dr. Sergei D. Tretiakov[1], e-mail: tretiacov@gmail.com;
Dr. Eugeny I. Yablochnikov[1], e-mail: eugeny@beepitron.com.
[1] St.Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

Abstract

This paper deals with the design development and manufacturing of inserts for injection molding of polymer optics. We present the research methodology and some results of experiments. Also we review a full production string of design, manufacturing and quality monitoring of mold inserts manufacturing technologies based on modern software and hardware.

Key words: mold inserts, polymer optics parts, group transfer mold, injection molding, precision milling center, micro milling, coordinate measuring machine, measuring, surface quality, CAD/CAM, 3D-modelling, roughness, accuracy of geometry measuring, profilometer.

Одним из перспективных направлений создания современных изделий в приборостроении является производство оптических изделий из термопластичных полимерных материалов (ТПМ) посредством их получения в инжекционных литьевых формах, что отражает одну из современных тенденций развития промышленного производства оптических изделий – переход от использования «традиционных» изделий из стекла к деталям из

ТПМ. При этом можно добиться улучшения эксплуатационных свойств, резкого снижения трудоёмкости изготовления деталей, улучшения внешнего вида деталей, сокращения времени на освоение новой конкурентоспособной продукции.

Производство конструктивно разных полимерных оптических деталей в определенном размерном диапазоне с использованием одного и того же оборудования (термопластавтомата) и оснастки (стандартного формопакета литьевой формы) целесообразно проводить на основе метода групповой технологии [1]. Для этого литьевая форма должна быть переналаживаемой за счет использования сменных формообразующих деталей (ФОД), которые подвергаются наибольшим конструктивным изменениям. В связи с этим для производства выявленной номенклатуры полимерных линз предложено спроектировать и изготовить групповую литьевую форму со сменными ФОД, для разработки которой использовались принципы и рекомендации, изложенные в [2].

Также при разработке оптических изделий в центре внимания, наряду с их конструктивными особенностями, всегда находятся вопросы достижения качества при их производстве, добиться которого можно применяя для изготовления ФОД электрозрозионную обработку с помощью электродов необходимой формы, либо высокоскоростную механическую обработку, в том числе микрообработку, 3-5 осевое фрезерование и микрофрезерование [3, 4]. При этом для литья оптических деталей приборов может понадобиться, так называемая, «зеркальная» полировка функциональных поверхностей ФОД [5]. Учитывая имеющееся оборудование и его технологические возможности в качестве основного процесса принята микрообработка.

Указанное выше направление успешно развивается за рубежом [3, 6]. Однако зарубежные фирмы не спешат делиться своими секретами производства подобных изделий. В связи с этим и учитывая вышесказанное необходимо самим пройти весь путь от проектирования до опытного производства полимерных оптических деталей, т.е. решить целый комплекс следующих задач:

- осуществить поиск (или разработку) наиболее подходящих полимерных материалов;
- спроектировать ряд полимерных линз;
- разработать переналаживаемую литьевую форму со сменными ФОД;
- провести моделирование процесса инжекционного литья;
- провести исследование и моделирование процессов высокоскоростной и микрообработки функциональных поверхностей ФОД;
- отработать технологию изготовления ФОД, обеспечивающую требуемое качество их функциональных поверхностей;
- собрать, испытать литьевую форму, изготовить опытную деталь на термопластавтомате;

- проконтролировать полученное качество изготовления полимерной линзы и при необходимости внести соответствующие изменения на предыдущих этапах проектирования и изготовления ФОД.

Все эти задачи решаются в рамках пилотного проекта «Технологии проектирования и производства оптических изделий из термопластичных полимерных материалов», проводимого в НИУ ИТМО на кафедре технологии приборостроения.

В качестве объекта проектирования, исследования и последующего опытного производства приняты формообразующие детали переналаживаемой литьевой формы для изготовления полимерных линз литьем под давлением. Поэтому в рамках данной статьи мы ограничимся рассмотрением вопросов проектирования ФОД, исследования и моделирования процесса микрообработки их функциональных поверхностей, проектирования технологии изготовления ФОД, а также контроля качества изготовления их функциональных поверхностей.

Одним из факторов, определяющих качество решения проектных и опытных производственных задач, является использование современного программного обеспечения и технологического оборудования.

Требования, предъявляемые к форме и шероховатости рабочих поверхностей оптических деталей, определяют повышенные требования к соответствующим функциональным поверхностям ФОД, которые как было сказано ранее обеспечиваются микрообработкой на прецизионном вертикальном фрезерном обрабатывающем центре PRIMACON PFM 24 NGd (рис. 1).



а) б)

Рис. 1. Прецизионный вертикальный фрезерный обрабатывающий центр PRIMACON PFM 24 NGd: а) общий вид станка; б) результат чистовой обработки на мониторе следящей высокоскоростной камеры

Основными техническими характеристиками обрабатывающего центра, влияющими на обеспечение требований к точности формы функциональных поверхностей и их шероховатости являются:

1. точность позиционирования 1 мкм;

2. высокая частота вращения шпинделя n = 50000 об/мин;

3. возможность бесконтактного измерения и контроля состояния инструмента, что позволяет учесть его реальный размер и износ, а также возможность дальнейшего использования микро инструмента;

4. высокая скорость чтения строк управляющей программы;

5. возможность пятикоординатной обработки.

Проектирование конструкции ФОД, процедур их обработки и разработка управляющих программ для обрабатывающего центра PRIMACON PFM 24 NGd проводились с использованием CAD/CAM-системы CimatronE (версия 10), имеющей для этого специализированный модуль [7].

CAD/CAM-система позволяет и конструктору, и технологу использовать большое количество специальных методик и программных инструментов, направленных на автоматизацию разработки моделей, процедур обработки, управляющих программ. Наиболее интересным является, так называемый, «шаблон». Так как литьевая форма является групповой, то целесообразно разрабатывать шаблоны для проектирования как 3D-моделей ФОД, так и процедур их изготовления. Применительно к изготовлению ФОД шаблон процедуры это документ, созданный пользователем, содержащий сгруппированные по различным признакам комплексные процедуры обработки поверхностей. Тем самым технологу предоставляется возможность выбрать ту или иную, предварительно настроенную для комплексной детали процедуру обработки. Именно предустановки заложенные в комплексной процедуре позволяют сократить время на разработку операции и управляющей программы [8].

Также следует отметить, что возможность работать в микромасштабе впервые появилась именно в CAD/CAM-системе CimatronE благодаря внедрению модуля micromilling, который постоянно совершенствуется. Такая технология программирования обработки (micromilling) позволяет с высокой точностью просчитывать и отрисовывать траекторию перемещения инструмента, что позволяет существенно повысить качество получаемых изделий [4, 9].

Одной из целей пилотного проекта, как научно-исследовательской опытно-конструкторской разработки, является отработка технологии изготовления ФОД, используемых для мелкосерийного производства полимерных лиз. В связи с этим наиболее эффективным материалом самих ФОД будет алюминиевый сплав – дюралюминий марки Д16Т. Комплект ФОД состоит из матрицы, пуансона и вставок. 3D-модель матрицы со вставкой представлена на рис 2. Литьевая форма предназначена для получения группы полимерных линз диаметром от 4 мм до 40 мм и толщинами стенки от 1,2 мм до 6 мм. Поэтому формы матрицы и пуансона являются комплексными, благодаря чему обеспечивается быстрая переналадка при моделировании и производстве комплекта ФОД для производства схожих де-

талей. Основными конструктивными элементами матрицы являются: отверстия под толкатели; литники; формообразующие поверхности, формируемые в данном случае поверхностями матрицы и вставок.

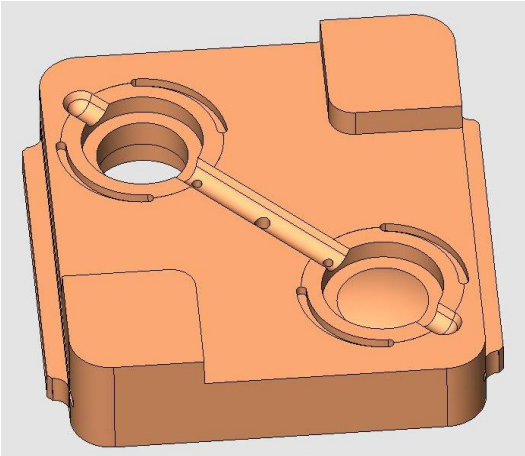


Рис. 2. Общая конструкция матрицы
переналаживаемой литьевой формы со вставкой под линзу

Для их изготовления необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести выбор рациональной стратегии фрезерования и режимов черновой обработки функциональных поверхностей ФОД с целью обеспечения максимальной производительности.

2. Провести выбор рациональной стратегии микрофрезерования и режимов чистовой обработки функциональных поверхностей ФОД с целью достижения минимальной шероховатости этих поверхностей Ra = 0,05 мкм.

3. Исследовать возможность проведения доводочной (полировальной) операции на прецизионном вертикально-фрезерном обрабатывающем центре. Провести подбор специального инструмента, стратегии и режимов его работы для обеспечения зеркальных функциональных поверхностей ФОД.

Основное внимание было уделено решению первых двух задач. Для этого был составлен план проведения экспериментов по поиску приемлемых стратегий черновой и чистовой обработки и определению оптимальных режимов резания. Основные цели экспериментов:

1) добиться шероховатости поверхности по Ra = 0,05 мкм

2) выбрать максимально производительную стратегию

3) выбрать максимально гибкую стратегию

4) оценить возможности применения стратегий для различных формфакторов.

Схема проведения экспериментов следующая. В качестве тестовой (обрабатываемой) поверхности назначена вогнутая сфера. Используемый инструмент для финишной обработки – твердосплавные фрезы со сферическим концом. Обрабатываемый материал – дюралюминий Д16Т. Обработка функциональных поверхностей ФОД проводилась с учетом следую-

щих параметров, влияющих на ее результаты: стратегии обработки; вида фрезерования (3D, 5D – в настоящее время используется 3-х координатная обработка); скорости резания; подачи; величины припуска на обработку; диаметра инструмента.

Так, например, наилучший результат по производительности при получистовой обработке сферической поверхности с радиусом кривизны R15 мм и глубиной погружения 10 мм в заготовке ∅20 мм концевой твердосплавной фрезой ∅5 мм со сферическим концом был достигнут при частоте вращения шпинделя n = 15000 об/мин, подаче 1000 мм/мин, глубине резания 0,2 мм и использовании стратегии фрезерования «правильная спираль изнутри наружу».

По параметру шероховатости максимально приблизиться к желаемой цели позволила чистовая обработка сферической поверхности (см. рис. 1 а) концевой твердосплавной фрезой ∅0,5 мм со сферическим концом при частоте вращения шпинделя n = 47000 об/мин, подаче 1700 мм/мин, глубине резания 0,02 мм и использовании стратегии фрезерования «3D, движение фрезы параллельно оси X».

Далее на этапе контроля выполнялось сравнение заданных и реальных характеристик функциональных поверхностей ФОД.

Для контроля геометрии функциональных поверхностей использовалась координатно-измерительная машина DEA Global Performance 05.07.05 (рис. 3) с высокой разрешающей способностью около 0,04 мкм, работающая под управлением программного обеспечения PC–DMIS 2012 MR1**.**

Для удобного отображения результатов измерения геометрических параметров функциональных поверхностей ФОД литьевых форм использовались возможности программного обеспечения PC-DMIS 2012 MR1. Для ускорения анализа геометрических размеров функциональных поверхностей ФОД с точки зрения их нахождения в пределах или выхода за пределы поля допуска использовалось представление результатов измерений в виде набора (облака) точек, совмещенных с трехмерной моделью.

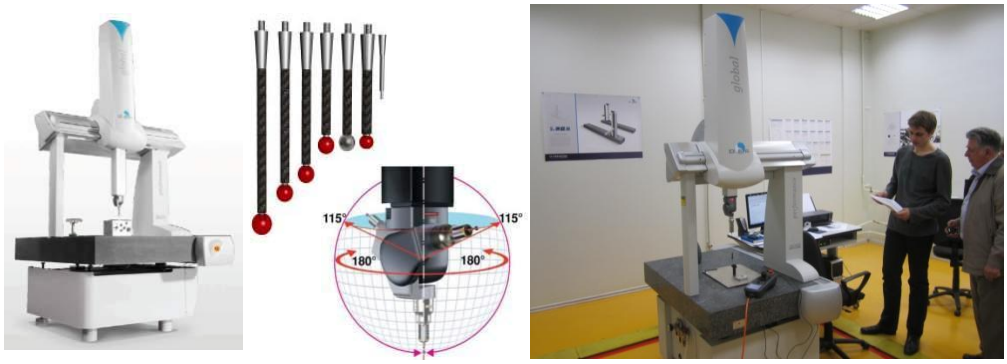


Рис. 3. Координатно-измерительная машина DEA GlobalPerformance 05.07.05

Программа позволяет получать облако точек с отображением измеренных точек различными цветами. Для поверхностей, имеющих размеры с разными допусками, создаются разные облака точек, каждому из которых соответствует свой допуск. При необходимости около точек отображаются численные значения отклонений размеров поверхностей. Полностью эта технология раскрывается при использовании «сканирования». При этом методе измерения щуп касается контролируемой поверхности и идет по заданному пути, получая координаты реальных точек поверхности на всем протяжении измерения. При использовании данного метода измерения и представления результатов измерения в виде облака точек значительно увеличивается скорость работы по сравнению с традиционными контактными измерениями, т.к. наглядно видно, для каких поверхностей их форма и контролируемые размеры выходят за границы допусков.



Рис. 4. Профилограф-профилометр HommelWerkeT8000

Контроль шероховатости функциональных поверхностей проводился на профилографе-профилометре HommelTesterT8000 (рис. 4), который имеет разрешение 0,001 мкм и позволяет выполнять измерения в соответствии со стандартами ISO и DIN.

Очевидно, что свойства поверхностного слоя формообразующих элементов литьевых форм оказывают существенное влияние на качество изготавливаемой с их помощью продукции. Как показывает практика, для адекватной оценки влияния характера микрогеометрии поверхностей на различные функциональные свойства необходимо проведение экспериментальных исследований.

В настоящее время многочисленные исследования показывают, что стандартизированные параметрические критерии оценки микрогеометрии не могут адекватно оценить степень влияния шероховатости поверхности на различные функциональные свойства [10, 11]. Используемый в наших исследованиях профилограф-профилометр HommelTesterT8000 позволяет не только провести точные измерения поверхностного слоя при помощи стандартных критериев оценки шероховатости, но и использовать полученные данные для более информативной непараметрической оценки. Предварительные результаты исследований позволяют сделать вывод о за-

висимости характера изменения микрогеометрии поверхностей ФОД литьевых форм от выбранной стратегии обработки микрофрезерованием (рис. 5).

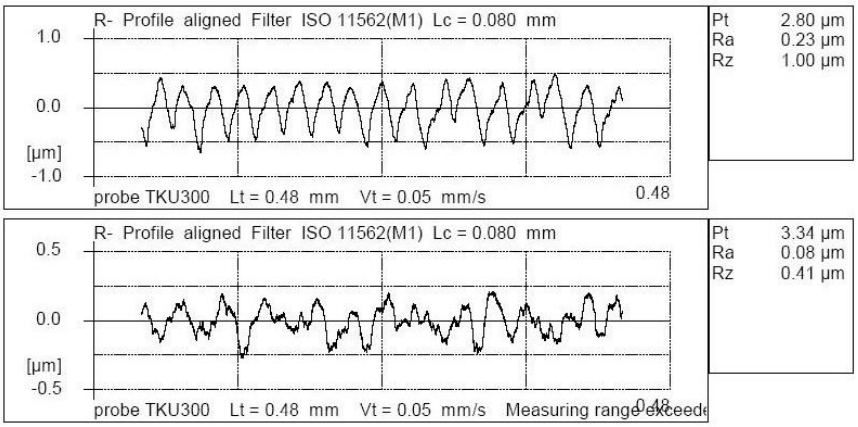


Рис. 5. Характер микрогеометрии поверхностей литьевых форм, обработанных разными стратегиями микрофрезерования

Последующие эксперименты будут направлены на исследование зависимости между характером микрорельефа функциональных поверхностей ФОД литьевых форм, обработанных при различных режимах резания и стратегиях микрообработки, и качественными характеристиками изготавливаемых с их помощью деталей.

Таким образом, выстроена технологическая цепочка проектирования, изготовления и контроля ФОД, являющаяся основой для создания комплекса методик и услуг, позволяющих существенно сократить затраты на освоение инновационных разработок и способствовать распространению новейших технологий в области создания оптических изделий в РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанов С.П. Групповая технология изготовления заготовок серийного производства. – Л.: Машиностроение, Ленингр.отд-ние, 1985. – 240 с.
2. Казмер Д.О. Разработка и конструирование литьевых форм / пер. с англ.; под ред. В.Г. Дувидзона. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2011.– 464 с.
3. Йорген В. Боденхаузен, Вольфганг Мюллер. Новые технологии и средства микрофрезерования [Электронный ресурс] // САПР и графика. 2008. №5. URL: http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7818&iid=317 (дата обращения: 03.12.2012).
4. T. Gietzelt, L. Eichhorn. Mechanical Micromachining by Drilling, Milling and Slotting [Электронный ресурс] // Karlsruhe Institute of Technology,

Campus Nord, Institute for Micro Process Engineering, Karlsruhe, Germany. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/27085/InTech-Mechanical_micromachining_by_drilling_milling_and_slotting.pdf (дата обращения: 03.01.2013).
5. Ботциан А., Аргманн К. Современные технологии зеркальной полировки / пер. с нем.; под ред. В.Г. Дувидзона. – СПб.: ЦОП «Профессия»,– 2012. – 152 с.
6. Andrew W. McFarland, Jonathan S. Colton. Production and Analysis of Injection Molded Micro-Optic Component [Электронный ресурс] // Center for Polymer Processing and The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0405. URL: http://www-old.me.gatech.edu/jonathan.colton/plasticoptics.pdf (дата обращения: 03.01.2013).
7. Mold making using Cimatron [Электронный ресурс] // URL: http://www.cimatron.com/sip_storage/files/7/2397.pdf. (дата обращения: 03.12.2012).
8. Яблочников Е.И., Молочник В.И., Гусельников В.С. Метод разработки групповых технологических процессов для оборудования с числовым программным управлением // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – №6. – С. 63-67.
9. Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И. Информационные технологии в проектировании и производстве. – СПб.: Политехника, 2008. – 304 с.
10. Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов: Учебное пособие / В.А. Валетов [и др.]. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 92 с.
11. Третьяков С.Д., Юльметова О.С. О проблемах оптимизации микрогеометрии поверхностного слоя деталей приборов // Известия вузов. «Приборостроение», т. 53, № 8. – СПб.: 2010. – С. 12-15.

УДК 621.833.6

Г.Ю. Волков, С.В. Колмаков

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ЦЕНТРОИДНЫХ МЕХАНИЗМОВ И СИНТЕЗ БЕЗВОДИЛЬНЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ



Глеб Юрьевич Волков, к.т.н, доцент
Курганский государственный университет
ул. Гоголя, 25, Курган, 640669, Россия
Тел.: 8 (3522) 23-36-12 (служебный), E-mail: vlkv48@mail.ru.



Станислав Витальевич Колмаков, аспирант
Курганский государственный университет
ул. Гоголя, 25, Курган, 640669, Россия
Тел.: 8-912-522-70-47, E-mail: stas160487@yandex.ru.

Аннотация

Предложена система формализованного описания структуры центроидных механизмов. Рассмотрены вопросы структурного синтеза безводильных планетарных передач. Получены новые схемы и конструкции передач с сателлитами, расположенными на двух уровнях, обладающие повышенной компактностью и нагрузочной способностью.

Ключевые слова: структурный синтез, центроидный механизм, двудольный граф, безводильная планетарная передача, два слоя сателлитов.

G.Y. Volkov, S.V. Kolmakov

FORMALIZATION OF CENTROID MECHANISMS STRUCTURE AND SYNTHESIS OF PLANETARY GEARS WITHOUT CARRIER

Dr. Gleb Yu. Volkov[1], e-mail: vlkv48@mail.ru
Stanislav V. Kolmakov[1], e-mail: stas160487@yandex.ru
[1]Kurgan State University, Russia

Abstract

The article is dedicated to the system of formalized description of the structure of centroid mechanisms. The issues of structural synthesis of planetary gears without carriers are considered. New schemes and constructions of gears with satellites situated at two levels were developed. These devices are of a higher compactness with high loading ability.

Key words: structural synthesis, centroid mechanism, bipartite graph, planetary transmission without carrier, two layers of satellites.

В технике широко применяются зубчатые и фрикционные передачи, подшипники качения и другие плоские механизмы, звенья которых взаимодействуют по центроидам, являющимся окружностями. Основным способом описания строения таких механизмов (как, впрочем, и большинства других видов механизмов) в настоящее время является графическое изображение их кинематических схем в сочетании с текстовым пояснением. Традиционный подход к структурированию центроидных механизмов, при котором основными элементами механической системы считаются звенья, в сочетании с методами комбинаторики даёт слишком большое количество неработоспособных вариантов схем. Нами разработана система формализованного описания центроидных механизмов, которая может быть применена для их каталогизации и структурного синтеза [1, 2].

Предлагается считать системообразующими элементами центроидных механизмов собственно круглые центроиды, т.е. охватываемую начальную окружность (ролик) и охватывающую начальную окружность (кольцо) – таблица 1. Прочие элементы, в частности рычажные звенья (если они присутствуют в механизме), рассматриваются на последующих уровнях структурирования. В зависимости от направления вращения, основные элементы разделены на две группы «А» и «Б» (рис. 1), причем, их взаимодействие возможно только между элементами разных групп. Таким образом, структура любого центроидного механизма описывается двудольным графом (матрицей связей). Это существенно сокращает количество возможных некорректных структурных вариантов.

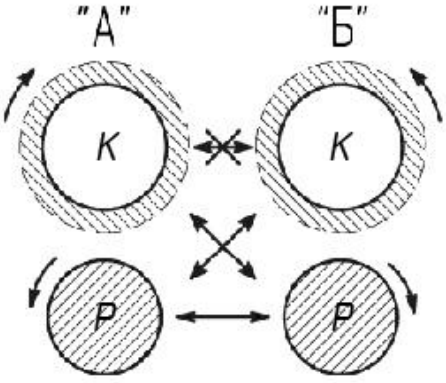
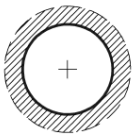
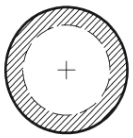
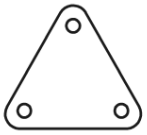
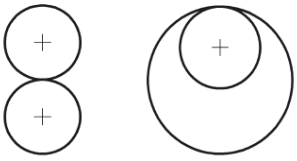
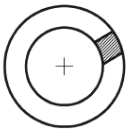
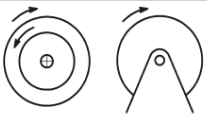
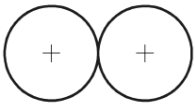
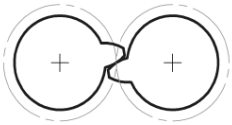
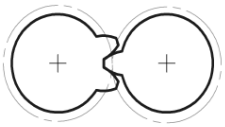


Рис. 1. Структурное условие кинематической совместимости элементов

Различаются виды связей между элементами (таблица 1). В чисто центроидных механизмах могут присутствовать только кинематические пары, образуемые зубчатыми звеньями, – символ **w** и высшие пары, образуемые «гладкими» поверхностями, – символ **r.**

Большинство центроидных механизмов обладают структурной симметрией вращения n-го порядка. Такие механизмы содержат неповторяющиеся (центральные) звенья кольца (К) и ролики (Р), а также повторяющиеся звенья ($К^n$) и ($Р^n$) (чаще всего это сателлиты). Вводим цифровое кодирование: К => «1», Р => «2», $К^n$ => «3», $Р^n$ => «4».

Таблица 1. Формализация структуры круглозвенных центроидных механизмов

	Базисная центроидная структура (БЦС)		**Дополнения**	
Элементы	Кольцо «**К**» 	Ролик «**Р**» 	Рычаг «**Н**» 	Ось «**О**» 
Связи	тангенциальная «**Т**» 	жесткая «**С**» 	жесткая «**с**» (S=3) 	вращательная «**v**» (S=2) 
Конкретизация связи вида «Т»	неудерживающая нормальная «**r**» (S=1) 	тангенциальная зубчатая «**T**» (S=1) 	центроидная зубчатая «**W**» (S=2) 	

Матрицу смежности двудольного графа, вершинами которого являются звенья видов: К, Р, $К^n$, $Р^n$, а связями: w, r и др., записанную в строку, называем структурной формулой механизма. Код центроидного механизма, содержащий только цифровые символы звеньев, записанные в определенном порядке, называем структурным числом [1, 2].

Синтез безводильных планетарных передач

Для иллюстрации возможностей предлагаемой формализации выполним синтез массива структур зубчатых безводильных планетарных передач (БПП). Безводильные передачи характеризуются большой нагрузочной способностью, но сравнительно невысоким КПД. Они могут с успехом применяться в приводах, рассчитанных на кратковременную работу, однако относятся пока к малоизученным, в том числе с точки зрения возможных структурных схем, механизмам.

1 этап. На первом этапе синтеза выбираем сложность синтезируемой системы, т.е. количество входящих в неё элементов, и задаём структурные ограничения, вытекающие из особенностей данного механизма. БПП – это планетарные передачи вида 3К [3]. Они содержат три основных, центральных элемента ЭЭЭ и промежуточные звенья – сателлиты, которые являются повторяющимися элементами системы, обладающей симметрией вращения n-го порядка. Примем дополнительное ограничение: «Сателлит – всегда ролик», в соответствии с [1] обозначим его $Р^n$. Проведём синтез БПП, в которых сателлиты расположены в один и два слоя. Эти системы будут иметь набор элементов:

$$ЭЭЭР^n, \quad ЭЭЭР^nР^n. \qquad (1)$$

2 этап. Проводим двудольное структурирование системы, т.е. распределяем элементы системы по двум группам. С учётом правил записи структурных чисел, исключающих изоморфизмы, элементы множеств, указанных в системе (1), можно разделить следующим образом:

$$ЭЭЭР^n,\ ЭЭЭ\text{-}Р^n,\ ЭЭ\text{-}ЭР^n,\ ЭЭР^n\text{-}Э;$$
$$ЭЭЭР^nР^n,\ ЭЭЭ\text{-}Р^nР^n,\ ЭЭЭР^n\text{-}Р^n,\ ЭЭР^n\text{-}ЭР^n,\ ЭЭР^nР^n\text{-}Э,\ ЭЭ\text{-}ЭР^nР^n. \quad (2)$$

Системы $ЭЭЭР^n$, $ЭЭЭР^nР^n$ «бракуем» по условию: «Нет элементов без связи». С учётом того, что связь возможна только между элементами разных групп – все элементы не могут находиться в одной группе. Центральные ЭЭЭ элементы БПП не могут взаимодействовать друг с другом, поэтому системы $ЭЭ\text{-}ЭР^n$, $ЭЭР^n\text{-}Э$, $ЭЭР^nР^n\text{-}Э$, $ЭЭ\text{-}ЭР^nР^n$, $ЭЭЭР^n\text{-}Р^n$ также отбрасываем. Система $ЭЭЭР^n\text{-}Р^n$ (или иначе $ЭЭЭР^n_Б\text{-}Р^n_А$) может быть реализована, однако, в ней сателлит $Р^n_А$ должен взаимодействовать со всеми остальными элементами – это уже БПП типа $ЭЭЭ\text{-}Р^n$. Другой сателлит – $Р^n_Б$, может взаимодействовать только с сателлитами $Р^n_А$, то есть, выполнять некоторую вспомогательную функцию (если в ней есть потребность). Значит, структура $ЭЭЭР^n\text{-}Р^n$ к принципиально новым конструкциям не приводит. Система $ЭЭЭ\text{-}Р^nР^n$ будет состоять из двух отдельных подсистем типа $ЭЭЭ\text{-}Р^n$, работающих параллельно, то есть одна из них будет представлять пассивную связь.

Остаются только варианты:

$$ЭЭЭ\text{-}Р^n; \qquad ЭЭР^n\text{-}ЭР^n. \quad (3)$$

3 этап. Третий этап синтеза состоит в конкретизации вида центральных элементов – кольцо К или ролик Р. Для удобства перечисления структурных вариантов используем цифровое кодирование [1] элементов системы: К=>«1», Р=>«2», $Р^n$=>«4». Совокупность этих символов составляет структурное число системы. На уровне структурных чисел две системы (3) порождают следующие структурные варианты:

«111.4», «112.4», «122.4», «222.4»; (4)
«114.14», «114.24», «124.14», «124.24», «224.14», «224.24». (5)

4 этап – На этой стадии синтеза решается задача о наличии и видах связей между элементами БЦС, а результатом синтеза будут структуры кинематических цепей.

Для БПП с одним слоем сателлитов, отвечающих структурным числам (4), вопрос о выборе связей между элементами решается однозначно:

«111.4» – $К\ К\ К \times Р^n$: www; (6)
«112.4» – $К\ К\ Р \times Р^n$: www; (7)
«122.4» – $К\ Р\ Р \times Р^n$: www; (8)
«222.4» – $Р\ Р\ Р \times Р^n$: www. (9)

В случае БПП с двумя слоями сателлитов, характеризующихся структурными числами (5), принципиально осуществимыми являются кинематические цепи соответствующие структурным формулам видов:

$$ЭЭР^n \times ЭР^n: oow, www, \quad (10)$$

$$ЭЭР^n \times ЭР^n: oow, www^2, \quad (11)$$

где символ «о» означает отсутствие связи.

Структура (11), в которой сателлиты двух слоев взаимодействуют между собой, имеет существенные преимущества. Она порождает шесть структурных формул кинематических цепей:

$$«114.14» – K\,K\,P^n \times K\,P^n: oow, www^2; \quad (12)$$

$$«114.24» – K\,K\,P^n \times P\,P^n: oow, www^2; \quad (13)$$

$$«124.14» – K\,P\,P^n \times K\,P^n: oow, www^2; \quad (14)$$

$$«124.24» – K\,P\,P^n \times P\,P^n: oow, www^2; \quad (15)$$

$$«224.14» – P\,P\,P^n \times K\,P^n: oow, www^2; \quad (16)$$

$$«224.24» – P\,P\,P^n \times P\,P^n: oow, www^2. \quad (17)$$

5 этап – Пятый этап синтеза состоит в переходе от кинематической цепи к механизму, т.е. в выборе ведущего, ведомого и опорного (неподвижного) звеньев. В структурной формуле эту информацию отобразим, заключив символы звеньев в скобки: ведущее – «()», ведомое – «{}», опорное – «[]».

БПП с одним слоем сателлитов

Проанализируем возможные варианты схем механизмов БПП с одним слоем сателлитов (см. таблицу 2).

Формальная перестановка символов «()», «{}», «[]» для каждой из четырёх кинематических схем (6)…(9) даёт по шесть структурных вариантов механизмов, часть из которых изоморфны друг другу. Не повторяющиеся структуры БПП приведены в таблице 2.

Полученные структуры подлежат анализу с позиций: их кинематических возможностей, конструктивных и технологических ограничений реализации, компоновочных особенностей и т. д.

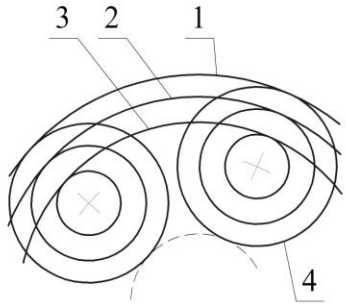
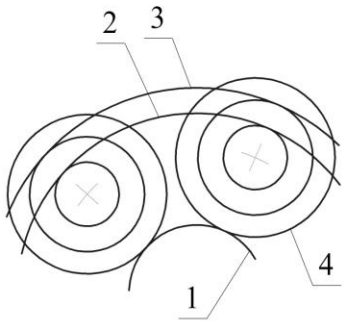
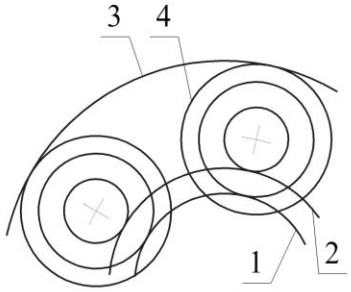
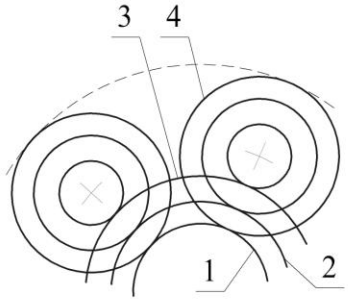
Главной кинематической характеристикой механической передачи, является передаточное отношение. Общая формула для определения передаточного отношения передач 3К, в том числе БПП, имеет вид:

$$i_{AB}^{C} = \frac{1-(-1)^{n_{AC}}\left|i_{AC}^{H}\right|}{1-(-1)^{n_{BC}}\left|i_{BC}^{H}\right|}. \quad (18)$$

Индекс А относится к ведущему звену, В – к ведомому, С – к опорному, а Н к «мнимому» водилу. Таким образом, i_{AB}^{C} – передаточное отношение от ведущего звена А к ведомому звену В при остановленном звене С; i_{AC}^{H} и i_{BC}^{H} – соответствующие передаточные отношения при остановлен-

ном «мнимом» водиле; n_{AC} и n_{BC} – количество внешних зацеплений в кинематической схеме от звена A к звену C или от звена B к звену C. В таблице 2 формулы передаточных отношений приведены с учётом конкретных чисел n_{AC} и n_{BC}.

Таблица 2. Схемы безводильных передач с одним слоем сателлитов

Стр. чис.	Кинематическая схема	Механизмы: Структура	Механизмы: Перед. отн.	Группа	Источник
«111.4»		$(K_1)\{K_2\}[K_3]\times P_4^n$	$i_{12}^3=\frac{1-\lvert i_{13}^H\rvert}{1-\lvert i_{23}^H\rvert}$	P_y	A.c. 1744336
«112.4»		$(K_2)\{K_3\}[P_1]\times P_4^n$	$i_{23}^1=\frac{1+\lvert i_{21}^H\rvert}{1+\lvert i_{31}^H\rvert}$	P-M	-
		$(K_2)[K_3]\{P_1\}\times P_4^n$	$i_{21}^3=\frac{1-\lvert i_{23}^H\rvert}{1+\lvert i_{13}^H\rvert}$	M_H	-
		$\{K_2\}[K_3](P_1)\times P_4^n$	$i_{12}^3=\frac{1+\lvert i_{13}^H\rvert}{1-\lvert i_{23}^H\rvert}$	P	US 3675510
«122.4»		$[K_3](P_1)\{P_2\}\times P_4^n$	$i_{12}^3=\frac{1+\lvert i_{13}^H\rvert}{1+\lvert i_{23}^H\rvert}$	P-M	GB 1418284 фиг. 2, 4
		$[K_3]\{P_1\}(P_2)\times P_4^n$	$i_{21}^3=\frac{1+\lvert i_{23}^H\rvert}{1+\lvert i_{13}^H\rvert}$	M_H	-
		$(K_3)\{P_1\}[P_2]\times P_4^n$	$i_{31}^2=\frac{1+\lvert i_{32}^H\rvert}{1-\lvert i_{12}^H\rvert}$	P	WO92053724
«222.4»		$(P_1)\{P_2\}[P_3]\times P_4^n$	$i_{12}^3=\frac{1-\lvert i_{13}^H\rvert}{1-\lvert i_{23}^H\rvert}$	P_y	GB 1418284 фиг. 1, 3

Знаки «+» в числителе и знаменателе показывают, что передаточное число i_{AB}^C является конечным при любых значениях чисел зубьев всех ко-

лес механизма. На практике это означает, что передаточное число данного механизма сравнительно невелико (в пределах 1…4). Такие механизмы могут работать в режиме редуктора и мультипликатора – отметка «Р-М» в таблице 2.

Знаки «+» в числителе и «-» в знаменателе говорят о том, что передача обладает большой (теоретически бесконечно большой) редуцирующей способностью – отметка «Р».

Обратное сочетание знаков: «-» в числителе и «+» в знаменателе, соответствуют мультипликатору – отметка «M_H». При больших передаточных числах, такие мультипликаторы неработоспособны.

Передачи, для которых знаки «-» стоят в числителе и знаменателе формулы (18), при определённом сочетании чисел зубьев могут служить в качестве редукторов с большим передаточным числом – отметка «P_y».

Таким образом, согласно анализу кинематических возможностей, к использованию в качестве редуктора с большим передаточным числом пригодны схемы с отметками «Р» и «P_y».

Патентный поиск показывает, что все представляющие интерес варианты БПП с одним слоем сателлитов уже известны (см. таблицу 2). Наиболее распространена (патенты: US 137267, US 3675510, RU 2122668 и др.) одна из схем группы «Р»: «112.4» – $\{K_2\}\{K_3\}(P_1)\times P^n_4$: www. Другая схема группы «Р»: «122.4» – $(K_3)\{P_1\}[P_2]\times P^n_4$: www использована в передаче по патенту WO 9205372.

Достоинством БПП группы «Р» является простота их конструкции, а недостатки связаны с относительным расположением центральных колес. Пара сил, приложенных к сателлиту со стороны ведомого и опорного колес, вызывает перекос сателлита. При обеспечении симметрии нагружения сателлита за счет разделения венца ведомого или ведущего колеса на две части съём движения с ведомого колеса (или подвод движения к ведущему колесу) может осуществляться только в радиальном направлении с помощью дополнительной передачи.

Схемы группы «P_y» для обеспечения устойчивости системы требуют обязательного присутствия дополнительных «гладких» удерживающих колец К или роликов Р:

«1222.4» – $K(P_1)\{P_2\}\{P_3\}\times P^n_4$:wwwr – патент GB 1418284, фиг. 1,3;
«1112.4» – $(K_1)\{K_2\}\{K_3\}P\times P^n$:wwwr – А.с. СССР 1744336.

В БПП группы «P_y» подача и снятие движения осуществляется в осевом направлении, но конструкция получается усложненной из-за удерживающих колец и больших ступеней на сателлитах.

Работоспособными можно признать также схемы с отметкой «Р-М»: «122.4» – $[K_3]\ (P_1)\ \{P_2\}\times P^n_4$: www; «112.4» – $(K_2)\ \{K_3\}\ [P_1]\times P^n_4$: www, однако они не обеспечивают больших передаточных чисел, проигрывают более простым передачам по КПД и, поэтому, не востребованы.

БПП с двумя слоями сателлитов

На 4-м этапе синтеза механизмов БПП получены шесть структур (12)…(17) кинематических цепей с двумя слоями сателлитов. Комбинируя символы «()», «{}», «[]», получаем 6×6=36 структур механизмов, часть из которых повторяют друг друга. Неизоморфные варианты БПП приведены в таблице 3.

Примечательно, что ранее известной (А. с. СССР 1017860) оказалась только одна из схем БПП с двумя слоями сателлитов:

«114.24» – $\{K_2\}\ [K_3]\ P^n_4 \times (P_1)\ P^n_5$: oow, www^2 .

Выполним анализ схем механизмов. Подобно БПП с одним слоем сателлитов, по кинематическому признаку выделяем группы «Р», «$P_у$», «Р-М» и «$M_н$». Оценки «Р-М» и «$M_н$» предопределяют тот же вывод – схемы не представляют ценности.

Оценка «$P_у$», которую получила и единственная из известных схем, в данном случае имеет несколько иной смысл. Такие схемы могут обеспечить неограниченно большое передаточное число, в принципе не требуют удерживающих колец, однако они не обладают преимуществами по сравнению с более простыми БПП группы «Р» с одним слоем сателлитов.

Группа «Р» в случае двухслойных БПП, напротив, получает преимущества над однослойными, в первую очередь, за счет возможности осевого подвода и съёма движения.

Рядом полезных свойств обладают схемы:

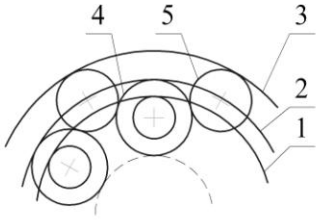
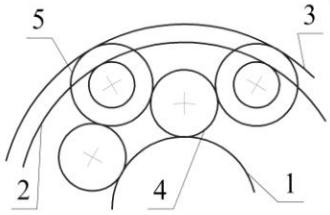
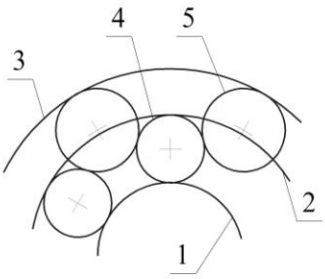
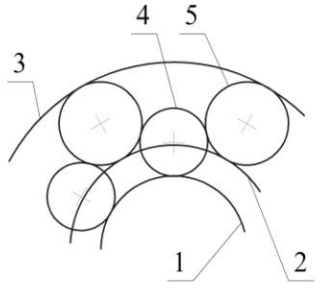
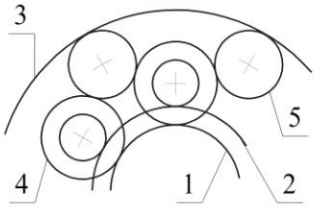
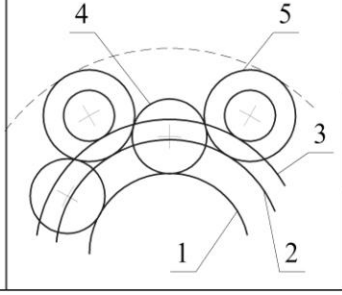
«124.14» – $(K_2)\ [P_1]\ P^n_4 \times \{K_3\}\ P^n_5$: oow, www^2;
«124.24» – $\{K_3\}\ [P_1]\ P^n_4 \times (P_2)\ P^n_5$: oow, www^2,

защищенные патентом RU 2423634. В них «силовые» центральные колеса «{}» и «[]» расположены по разные стороны от сателлитов, поэтому на сателлитах не создаётся перекашивающих моментов. Эти передачи достаточно просты по конструкции, компактны, благодаря многопоточности обладают высокой нагрузочной способностью.

Схема «1142.14» – $[K]\{K\}P^nP\times(K)P^n$: oowo, www^2r – полезная модель RU 105387, снабжена поддерживающими роликами Р. Съём нагрузки с выходного вала происходит в осевом направлении. Передача позволяет получить большое передаточное отношение. Теоретически передаточное отношение может быть бесконечно большим, на практике оно, как и в случае любой другой передачи 3К, ограничено снижением КПД.

Схема «1224.24» – К $\{P_1\}\ (P_2)\ P^n_4 \times [P_3]\ P^n_5$: oow, www^2 – патент RU 2442045, содержит поддерживающие кольца К. Изобретение позволяет уменьшить габариты редуктора, увеличить нагрузочную способность, повысить технологичность.

Таблица 3. Схемы безводильных передач с двумя слоями сателлитов

Стр. чис.	Кинематическая схема	Механизмы		Группа	Источник
		Структура	Перед. отн.		
1	2	3	4	5	6
«114.14»		$(K_1)[K_3]P_4^n\times\{K_2\}P_5^n$	$i_{12}^3=\frac{1+\lvert i_{13}^H\rvert}{1+\lvert i_{23}^H\rvert}$	P-M	-
		$[K_2]\{K_3\}P_4^n\times(K_1)P_5^n$	$i_{13}^2=\frac{1-\lvert i_{12}^H\rvert}{1+\lvert i_{32}^H\rvert}$	M_H	-
		$\{K_1\}[K_2]P_5^n\times(K_3)P_4^n$	$i_{31}^2=\frac{1+\lvert i_{32}^H\rvert}{1-\lvert i_{12}^H\rvert}$	P	RU 105387
«114.24»		$\{K_2\}[K_3]P_4^n\times(P_1)P_5^n$	$i_{12}^3=\frac{1-\lvert i_{13}^H\rvert}{1-\lvert i_{23}^H\rvert}$	P_y	A.c. 1017860
«124.14»		$[K_2](P_1)P_5^n\times\{K_3\}P_4^n$	$i_{13}^2=\frac{1+\lvert i_{12}^H\rvert}{1+\lvert i_{32}^H\rvert}$	P-M	-
		$\{K_2\}(P_1)P_5^n\times[K_3]P_4^n$	$i_{12}^3=\frac{1-\lvert i_{13}^H\rvert}{1+\lvert i_{23}^H\rvert}$	M_H	-
		$(K_2)[P_1]P_5^n\times\{K_3\}P_4^n$	$i_{23}^1=\frac{1+\lvert i_{21}^H\rvert}{1-\lvert i_{31}^H\rvert}$	P	RU 2423634 фиг. 8, 9
«124.24»		$\{K_3\}(P_1)P_4^n\times[P_2]P_5^n$	$i_{13}^2=\frac{1+\lvert i_{12}^H\rvert}{1+\lvert i_{32}^H\rvert}$	P-M	-
		$[K_3](P_1)P_4^n\times\{P_2\}P_5^n$	$i_{12}^3=\frac{1-\lvert i_{13}^H\rvert}{1+\lvert i_{23}^H\rvert}$	M_H	-
		$\{K_3\}[P_1]P_4^n\times(P_2)P_5^n$	$i_{23}^1=\frac{1+\lvert i_{21}^H\rvert}{1-\lvert i_{31}^H\rvert}$	P	RU 2423634 фиг. 1, 2
«224.14»		$(P_1)\{P_2\}P_5^n\times[K_3]P_4^n$	$i_{12}^3=\frac{1-\lvert i_{13}^H\rvert}{1-\lvert i_{23}^H\rvert}$	P_y	-
«224.24»		$\{P_1\}(P_2)P_5^n\times[P_3]P_4^n$	$i_{21}^3=\frac{1-\lvert i_{23}^H\rvert}{1+\lvert i_{13}^H\rvert}$	P-M	-
		$[P_1](P_2)P_5^n\times\{P_3\}P_4^n$	$i_{23}^1=\frac{1+\lvert i_{21}^H\rvert}{1+\lvert i_{31}^H\rvert}$	M_H	-
		$(P_1)\{P_2\}P_5^n\times[P_3]P_4^n$	$i_{12}^3=\frac{1+\lvert i_{13}^H\rvert}{1-\lvert i_{23}^H\rvert}$	P	RU 2442045

В результате выполнения данного исследования подтверждена корректность разработанной системы формализованного описания центроидных механизмов и эффективность опирающегося на него метода структурного синтеза. Получена гамма новых механизмов – БПП с двумя слоями сателлитов, использование которых позволит улучшить массо-габаритные характеристики и увеличить нагрузочную способность ряда машин, например, привода задвижки трубопроводной арматуры и механизма натяжения гусеницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков, Г.Ю. Систематика и структурно-параметрический синтез механизмов на базе замкнутых систем тел качения: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. / Г.Ю. Волков. Курган, 2012. – 36 с.
2. Волков, Г.Ю. Формализованное отображение и систематика структур плоских многозвенных зубчатых и фрикционных механизмов / Г.Ю. Волков // Вестник машиностроения. – 2011. – № 1. – С. 20-23.
3. Кудрявцев, В.Н. Планетарные передачи: изд. 2-е / В. Н. Кудрявцев. – Л. : Машиностроение, 1966. – 308 с.

УДК 539.3

В.В. Елисеев

ДИНАМИКА, КРИТИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ И БАЛАНСИРОВКА ТЕРМОУПРУГИХ РОТОРОВ



Елисеев Владимир Васильевич, д.ф.-м.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812) 650-9353, E-mail: yeliseyev@inbox.ru

Аннотация

Рассматривается линейная динамика термоупругого ротора во вращающейся системе отсчета. Силы инерции качественно меняют жесткость. Появляются критические режимы, устранимые балансировкой. Представлены континуальные и дискретные математические модели.

Ключевые слова: линейная термоупругость, вращающийся ротор, силы инерции, критические скорости, условия балансировки.

V.V.Yeliseyev

DYNAMICS, CRITICAL SPEEDS AND BALANCING THERMOELASTIC ROTORS

Yeliseyev Vladimir V., Dr. of Physics and Mathematics, Professor,
St. Petersburg State Polytechnic University, Russia
e-mail: yeliseyev@inbox.ru

Abstract

Linear dynamics of a thermoelastic rotor in a rotating axes of reference. Inertia forces change rigidity qualitatively. Critical regimes are recoverable by balancing adjustment. Continual and discreet mathematical models are presented.

Key words: linear thermoelasticity. rotating rotor, inertia forces, critical speeds, balancing conditions.

Динамике роторов посвящено много работ; [1,2,4,5] – малая часть списка литературы в этой области. Но для большинства работ характерно чрезмерно упрощенное представление ротора как упругой конструкции; средства теории упругости используются недостаточно.

Не только механические, но и тепловые воздействия вызывают деформацию ротора и, как следствие, разбалансировку с интенсивной вибрацией на критических скоростях.

В качестве основы моделирования динамики ротора при термомеханических нагрузках рассматриваем следующую классическую постановку задачи [3,6]:

$$\nabla\cdot\underline{\underline{\tau}}+\underline{f}=0,\quad \underline{\underline{\tau}}=\frac{\partial\Pi}{\partial\underline{\underline{\varepsilon}}}={}^4\underline{\underline{C}}\cdot\cdot(\underline{\underline{\varepsilon}}-\underline{\underline{\alpha}}T),\quad \underline{\underline{\varepsilon}}=\nabla\underline{u}^S;\quad \underline{u}|_{O_1}=\underline{u}_0,\quad \underline{n}\cdot\underline{\underline{\tau}}|_{O_2}=\underline{p}.$$

(1)

Здесь $\underline{\underline{\tau}},\underline{\underline{\varepsilon}}$ – тензоры напряжений и деформаций, $\underline{u}$ – вектор перемещений, ∇ – оператор Гамильтона, $\underline{f}$ – вектор объемных сил (включая силы инерции), Π – свободная энергия на единицу объема, ${}^4\underline{\underline{C}}$ – тензор жесткостей материала (4-го ранга), $\underline{\underline{\alpha}}$ – тензор коэффициентов теплового расширения, T – изменение температуры, $(...)^S$ – знак симметрирования, $\underline{u}_0$ – заданные перемещения на части границы O_1, $\underline{p}$ – заданные поверхностные силы на остальной части границы O_2.

Линейная постановка (1) допустима только при малых перемещениях, деформациях и поворотах. Для применения к вращающемуся ротору необходимо ввести соответствующую подвижную систему отсчета. На рис. 1 ротор вращается с заданной угловой скоростью Ω вокруг оси z, и так же вращается пара декартовых осей x_1, x_2.

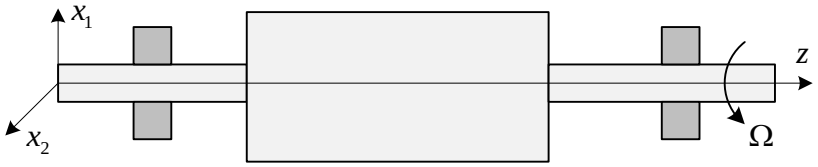


Рис. 1

Тройка декартовых осей x_1, x_2, z является той подвижной системой отсчета, в которой рассматривается линейная постановка (1). Орты осей: $\underline{i}_\alpha, \underline{k}$.

Во введенной системе отсчета к обычным физическим силам следует добавить две силы инерции: переносного движения $\underline{f}_e$ и Кориолиса $\underline{f}_c$. Радиус-вектор точки $\underline{R}=\underline{r}+\underline{u}$, где $\underline{r}=\underline{x}+z\underline{k}$ – он же до деформации ($\underline{x}=x_\alpha\underline{i}_\alpha$, суммируем по повторяющемуся индексу). Выражения сил инерции:

$$\underline{f}_e=-\rho\Omega^2\underline{k}\times(\underline{k}\times\underline{R})=\rho\Omega^2\underline{R}_\perp,\quad \underline{R}_\perp\triangleq\underline{R}-R_z\underline{k};\quad \underline{f}_c=-2\rho\Omega\underline{k}\times\dot{\underline{R}}$$

(2)

(ρ – плотность). Отметим, что дифференцирование по времени соответствует относительному движению: $\dot{\underline{R}}=\dot{\underline{u}}$ – относительная скорость, $\ddot{\underline{R}}=\ddot{\underline{u}}$ – относительное ускорение. В (1) в качестве силы следует подставить

$$\underline{f} = \underline{f} + \rho(\Omega^2(\underline{x}+\underline{u}_\perp) - 2\Omega\underline{k}\times\dot{\underline{u}} - \ddot{\underline{u}}). \qquad (3)$$

Первое слагаемое в скобках – центробежная сила. Физические силы $\underline{f}$ представлены, в частности, гравитацией и действием магнитного поля на обмотки с током.

Система уравнений и граничных условий (1) эквивалентна следующей вариационной постановке

$$\int_V (\delta\Pi - \underline{f}\cdot\delta\underline{u})dV - \int_{O_2} \underline{p}\cdot\delta\underline{u}\,dO = 0, \quad \underline{u}|_{O_1} \triangleq \underline{u}_0. \qquad (4)$$

Это принцип виртуальной работы Лагранжа-Даламбера. Для обоснования достаточно соотношений $\delta\Pi = \underline{\underline{\tau}}\cdot\cdot\delta\underline{\underline{\varepsilon}} = \nabla\cdot(\underline{\underline{\tau}}\cdot\delta\underline{u}) - \nabla\cdot\underline{\underline{\tau}}\cdot\delta\underline{u}$ и теоремы о дивергенции.

В (1) имеем «полную систему уравнений». Из нее сразу следуют «уравнения в перемещениях»:

$$\begin{aligned} &\nabla\cdot\underline{\underline{\tau}}^u + \underline{f} + \underline{\nabla\cdot\underline{\underline{\tau}}^T} = 0, \quad \underline{\underline{\tau}}^u \triangleq {}^4\underline{\underline{C}}\cdot\cdot\nabla\underline{u}, \quad \underline{\underline{\tau}}^T \triangleq -{}^4\underline{\underline{C}}\cdot\cdot\underline{\underline{\alpha}}T; \\ &\underline{u}|_{O_1} = \underline{u}_0, \quad \underline{n}\cdot\underline{\underline{\tau}}^u|_{O_2} = \underline{p}\underline{-\underline{n}\cdot\underline{\underline{\tau}}^T}. \end{aligned} \qquad (5)$$

Подчеркнуты температурные эквиваленты объемных и поверхностных сил. Имеем формальное сходство с изотермической статикой, что позволяет применять общие теоремы [3,6]. Особенно полезна теорема взаимности работ:

$$\int_V \underline{f}_1\cdot\underline{u}_2 dV + \int_O \underline{p}_1\cdot\underline{u}_2 dO = \int_V \underline{f}_2\cdot\underline{u}_1 dV + \int_O \underline{p}_2\cdot\underline{u}_1 dO \qquad (6)$$

для любых двух равновесных состояний. С помощью этой теоремы устанавливается свойство ортогональности собственных форм колебаний и выводятся обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) для главных координат (при разложении по формам).

Уточним вид тензоров ${}^4\underline{\underline{C}}, \underline{\underline{\alpha}}$. Для изотропного материала $\underline{\underline{\alpha}} = \alpha\underline{\underline{E}}$ (с единичным тензором) и

$$\begin{aligned} &\underline{\underline{\tau}} = 2\mu[\underline{\underline{\varepsilon}} + \frac{1}{1-2\nu}(\nu\varepsilon - (1+\nu)\alpha T)\underline{\underline{E}}], \quad \varepsilon \triangleq tr\,\underline{\underline{\varepsilon}}; \\ &\Pi = \mu[\underline{\underline{\varepsilon}}\cdot\cdot\underline{\underline{\varepsilon}} + \frac{1}{1-2\nu}(\nu\varepsilon^2 - 2(1+\nu)\alpha\varepsilon T]. \end{aligned} \qquad (7)$$

Здесь μ,ν – модуль сдвига и коэффициент Пуассона (модуль Юнга $E = 2\mu(1+\nu)$); производная $\partial\varepsilon/\partial\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{E}}$.

Вариационная постановка (4) позволяет строить приближенные решения по Ритцу с заданной аппроксимацией:

$$\underline{u} = \underline{U}_0 + \sum_{i=1}^{N} q_i(t)\underline{\varphi}_i(\underline{r}), \quad \underline{U}_0|_{O_1} = \underline{u}_0, \quad \underline{\varphi}_i|_{O_1} = 0, \quad \delta\underline{u} = \sum\underline{\varphi}_i\delta q_i. \qquad (8)$$

Для функций $q_i(t)$ получается система ОДУ. Метод конечных элементов является частным случаем такого подхода.

Подставим (3) в (5):

$$\nabla\cdot\underline{\underline{\tau}}^{u}+\rho(\Omega^2\underline{u}_{\perp}-2\Omega\underline{k}\times\dot{\underline{u}}-\ddot{\underline{u}})+\underline{\underline{f+\rho\Omega^2\underline{x}+\nabla\cdot\underline{\underline{\tau}}^{T}}}=0;$$
$$\underline{u}\,|_{O_1}=0,\quad \underline{n}\cdot\underline{\underline{\tau}}^{u}\,|_{O_2}=\underline{\underline{p-\underline{n}\cdot\underline{\underline{\tau}}^{T}}}. \tag{9}$$

Это – неоднородная задача динамики. Подчеркнуты источники неоднородности в объеме и на поверхности. Часть O_1 границы тела считается закрепленной во избежание «твердотельных» добавок $\underline{u}_*+\underline{\theta}_*\times\underline{r}$ к перемещениям.

От этой континуальной постановки можно перейти к дискретной посредством (4) и (8):

$$\underline{u}=\sum_{i=1}^{N}q_i(t)\underline{\varphi}_i(\underline{r}),\quad \underline{\varphi}_i\,|_{O_1}=0,\quad \underline{\underline{\varepsilon}}=\sum_{i=1}^{N}q_i\nabla\underline{\underline{\varphi}}_i^{S},\quad \underline{\underline{\tau}}=\sum_{i=1}^{N}q_i\,{}^4\underline{\underline{C}}\cdot\cdot\nabla\underline{\underline{\varphi}}_i^{S},$$
$$\int_V\{\underline{\underline{\tau}}\cdot\cdot\nabla\underline{\underline{\varphi}}_i^{S}-[\rho(\Omega^2\underline{u}_{\perp}-2\Omega\underline{k}\times\dot{\underline{u}}-\ddot{\underline{u}})+\underline{f}+\rho\Omega^2\underline{x}+\nabla\cdot\underline{\underline{\tau}}^{T}]\cdot\underline{\varphi}_i\}dV- \tag{10}$$
$$-\int_{O_2}(\underline{p}-\underline{n}\cdot\underline{\underline{\tau}}^{T})\cdot\underline{\varphi}_i dO=0\Rightarrow\underline{(C-\Omega^2C)q+\Omega G\dot{q}+M\ddot{q}=F}.$$

Введены столбец неизвестных $q=(q_i)^T$, матрицы

$$C=(\int_V\nabla\underline{\underline{\varphi}}_i^{S}\cdot\cdot\,{}^4\underline{\underline{C}}\cdot\cdot\nabla\underline{\underline{\varphi}}_k^{S}dV),\quad C=(\int_V\rho\underline{\varphi}_{i\perp}\cdot\underline{\varphi}_{k\perp}dV),$$
$$G=-2(\int_V\rho\underline{k}\cdot\underline{\varphi}_i\times\underline{\varphi}_k dV),\quad M=(\int_V\rho\underline{\varphi}_i\cdot\underline{\varphi}_k dV) \tag{11}$$

и столбец нагрузок

$$F=(\int_V(\underline{f}+\rho\Omega^2\underline{x}+\nabla\cdot\underline{\underline{\tau}}^{T})\cdot\underline{\varphi}_i dV+\int_{O_2}(\underline{p}-\underline{n}\cdot\underline{\underline{\tau}}^{T})\cdot\underline{\varphi}_i dO)^T. \tag{12}$$

Подчеркнутое в (10) уравнение можно считать основным в динамике упругих роторов. Оно содержит симметричные и положительные матрицы C,C,M, а также антисимметричную матрицу G. Матрица центробежных сил C похожа на матрицу инерции M и определяет некую отрицательную жесткость. Столбец нагрузок F определяется физическими силами, распределением масс и температурным полем. Опираясь на (10), можно рассматривать любые нестационарные задачи динамики ротора при силовых и тепловых воздействиях.

Для разъяснения дальнейшего обратимся к линейной статике конструкций с матрицей жесткости C, столбцом перемещений u и столбцом нагрузок F: $Cu=F$. Конструктивное условие разрешимости линейной алгебраической системы: правая часть должна быть ортогональна всем линейно-независимым решениям сопряженной однородной системы –

$$\underline{\psi_k^T f=0};\quad \psi_k:\quad C^T\psi=0. \tag{13}$$

Если $\det C\neq 0$, то $\psi=0$ – условие разрешимости выполнено для любой нагрузки f. Более интересен случай $\det C=0$, и он имеет отношение к динамике роторов. Вырожденность матрицы означает, что однородная задача имеет нетривиальное решение.

Отметим, что матрица жесткости упругой системы симметрична: $C^T = C$. Эта симметрия выражается теоремой взаимности: $u_2^T C u_1 = u_1^T C u_2$. Для упругой системы с исчезающей жесткостью условие разрешимости (13) является следствием теоремы взаимности. Эта теорема далее будет постоянно использоваться.

Обращаемся к (9) и – в соответствии с (13) – рассматриваем однородную задачу (статики):

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}^u + \rho\Omega^2 \underline{u}_\perp = 0; \quad \underline{u}|_{O_1} = 0, \quad \underline{n} \cdot \underline{\underline{\tau}}^u|_{O_2} = 0 \Rightarrow \Omega = \Omega_i, \quad \underline{u} = \underline{\Phi}_i, \quad i = 1,2,... \tag{14}$$

Значения Ω_i назовем критическими скоростями, функции $\underline{\Phi}_i(\underline{r})$ – формами. От задачи о главных колебаниях (14) отличается лишь тем, что подчеркнутое слагаемое содержит $\underline{u}_\perp$ вместо $\underline{u}$.

Собственные функции задачи (14) своими свойствами напоминают моды главных колебаний. Можно считать $\underline{\Phi}_i$ модами при соответствующей анизотропии инерционных свойств. Посредством теоремы взаимности доказывается ортогональность (с нормировкой) форм $\underline{\Phi}_i$:

$$\int_V \rho \underline{\Phi}_{i\perp} \cdot \underline{\Phi}_{k\perp} dV = \delta_{ik}. \tag{15}$$

Применим далее теорему взаимности (6), формально рассматривая (9) и (14) как две задачи статики:

$$\begin{aligned} &\int_V [\underline{f} + \rho\Omega^2 \underline{x} + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}^T - \rho(2\Omega \underline{k} \times \underline{\dot{u}} + \underline{\ddot{u}})] \cdot \underline{\Phi}_i dV + \\ &+ \int_{O_2} (\underline{p} - \underline{n} \cdot \underline{\underline{\tau}}^T) \cdot \underline{\Phi}_i dO = (\Omega_i^2 - \Omega^2) \int_V \rho \underline{\Phi}_{i\perp} \cdot \underline{u}_\perp dV. \end{aligned} \tag{16}$$

Аналогичные действия в теории колебаний дают ОДУ для главных координат – коэффициентов разложения $\underline{u}$ по собственным формам при расчете произвольных движений. Равенство (16) важно для дальнейшего.

В дискретной модели ротора имеем

$$\begin{aligned} &(C - \Omega_i^2 C)\Phi_i = 0, \quad \left|C - \Omega_i^2 C\right| = 0, \quad \Phi_i^T C \Phi_k = \delta_{ik} \\ &(F - G\dot{q} - M\ddot{q})^T \Phi_i = (\Omega_i^2 - \Omega^2) q^T C \Phi_i. \end{aligned} \tag{17}$$

Но адекватность этой модели зависит от выбора координатных функций $\underline{\varphi}_i$; их система должна быть достаточно представительной.

На скоростях Ω_i, являющихся собственными значениями однородных задач (14) или (17), «исчезает» эффективная жесткость $(C + \Omega^2 C)$ ротора. Такая трактовка несколько отличается от распространенных. На критических скоростях ротор «держит» нагрузку лишь динамически – посредством инерционных $(M\ddot{q})$ и гироскопических $(G\dot{q})$ реакций.

Задача (14) отличается от задачи о главных колебаниях отсутствием инерции осевого движения. Тогда по теореме Релея

$$\Omega_i \geq \omega_i - \qquad (18)$$

скорости Ω_i не меньше собственных частот колебаний ω_i.

Допустим, что силы $\underline{f}, \underline{p}$ и температурное поле T не зависят от времени (во вращающейся системе отсчета!). При равновесии и $\Omega = \Omega_i$ из (16) получим

$$\int_V (\underline{f} + \rho\Omega^2 \underline{x} + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}^T) \cdot \underline{\Phi}_i dV + \int_{O_2} (\underline{p} - \underline{n} \cdot \underline{\underline{\tau}}^T) \cdot \underline{\Phi}_i dO = 0. \qquad (19)$$

Это условие может служить основой теории балансировки упругих роторов. Только при выполнении (19) ротор «держит» статическое воздействие без ухода в динамику. При нарушении равенства (19) появятся интенсивные вибрации ротора.

Представляется, что практическая балансировка имеет целью выполнение (19). Установка балансировочного груза массой m_0 в точке с радиус-вектором $\underline{r}_o$ означает добавку к функции $\rho(\underline{r})$ слагаемого $m_0 \delta(\underline{r} - \underline{r}_o)$. Требуя выполнения (19), получим

$$m_0 = \frac{\int_V (\underline{f} + \rho\Omega^2 \underline{x} + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}^T) \cdot \underline{\Phi}_i dV + \int_{O_2} (\underline{p} - \underline{n} \cdot \underline{\underline{\tau}}^T) \cdot \underline{\Phi}_i dO}{-\Omega^2 (\underline{x} \cdot \underline{\Phi}_i)|_{\underline{r}=\underline{r}_o}}. \qquad (20)$$

Это относится к определенному заданному температурному полю (а также распределению масс и «статическим» нагрузкам $\underline{f}, \underline{p}$). При изменении поля возникает дисбаланс. Формула (20) дает точное значение изменения массы при изменении поля:

$$m_0 = \frac{\int_V \nabla \cdot \underline{\underline{\tilde{\tau}}}^T \cdot \underline{\Phi}_i dV - \int_{O_2} \underline{n} \cdot \underline{\underline{\tilde{\tau}}}^T \cdot \underline{\Phi}_i dO}{-\Omega^2 (\underline{x} \cdot \underline{\Phi}_i)|_{\underline{r}=\underline{r}_o}} = \frac{\int_V \underline{\underline{\tilde{\tau}}}^T \cdot\cdot \nabla \underline{\Phi}_i^S dV}{\Omega^2 (\underline{x} \cdot \underline{\Phi}_i)|_{\underline{r}=\underline{r}_o}} \quad (\underline{\underline{\tilde{\tau}}}^T = -{}^4\underline{\underline{C}} \cdot\cdot \underline{\underline{\alpha}} T). \qquad (21)$$

Заметим: знаменатель в (20), (21) может обращаться в нуль. Это означает, что балансировка невозможна – грузик следует поставить в другом месте.

Представленная теория использована как основа расчетной методики для новых роторов, создаваемых на предприятиях СПб. Малая относительная толщина роторов позволила ограничиться стержневыми моделями с характерными для них ОДУ (по z) [3]. Последние решались средствами компьютерной математики (Mathcad 14) даже при сложной нерегулярной зависимости диаметра сечения от продольной координаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.
2. Гусаров А.А. Динамика и балансировка гибких роторов. – М.: Наука, 1990. – 152 с.

3. Елисеев В.В. Механика деформируемого твердого тела. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 231 с.
4. Кельзон А.С., Циманский Ю.П., Яковлев В.И. Динамика роторов в упругих опорах. – М.: Наука, 1982. – 280 с.
5. Позняк Э.Л. Колебания роторов. В кн.: Вибрации в технике, в 6-ти т. Т.3. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 130-189.
6. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 711 с.

УДК 621.

Л.В. Ефремов

КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПРИВОДА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С ЭЛАСТИЧНОЙ МУФТОЙ ТИПА LMD



Леонид Владимирович Ефремов д.т.н., проф.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, профессор кафедры «Машиноведение и основы конструирования».
ул. Жукова, 17,Санкт-Петербург, Россия.
Тел.(812)545-0893; e-mail: levlefr@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены результаты исследования крутильных колебаний привода силой установки с уникальной эластичной муфтой типа LMD по оригинальным алгоритмам и программам монографии [1]. Даны рекомендации и способы выбора характеристик муфты, гарантирующих минимальные динамические нагрузки и их высокую надежность.

Ключевые слова: эластичная муфта, крутильные колебания, алгоритмы расчета.

LV. Efremov

TORSIONAL VIBRATIONS DRIVE POWER UNIT WITH ELASTIC COUPLING TYPE LMD

Dr. Sc., Professor Leonid V. Efremov, St. Petersburg Polytechnical University, Russia, e-mail: levlefr@mail.ru.

Abstract

The paper discusses the evaluation of torsional vibrations of the drive force of the installation with unique elastic coupling type LMD, calculated on the original algorithms and programs [1]. The recommendations and the methods for selecting the coupling characteristics that guarantee minimum dynamic load and high reliability couplings.

Key words: flexible coupling, torsional vibrations, calculation algorithms.

Силовые агрегаты тяжелой техники (комбайнов, бульдозеров, погрузчиков и т.п.) имеют приводы, оснащённые упругими муфтами. До недавнего времени отечественным заводам приходилось использовать импортные муфты таких фирм как Stromag, Centa, Vulkan и т.п., которые имели высокую стоимость, но не всегда были достаточно надежными. Положение на рынке указанной продукции резко улучшилось после того как ЗАО "Литмашдеталь" [2] разработало и поставило на серийное производство эластичные муфты типа LMD (рис. 1).

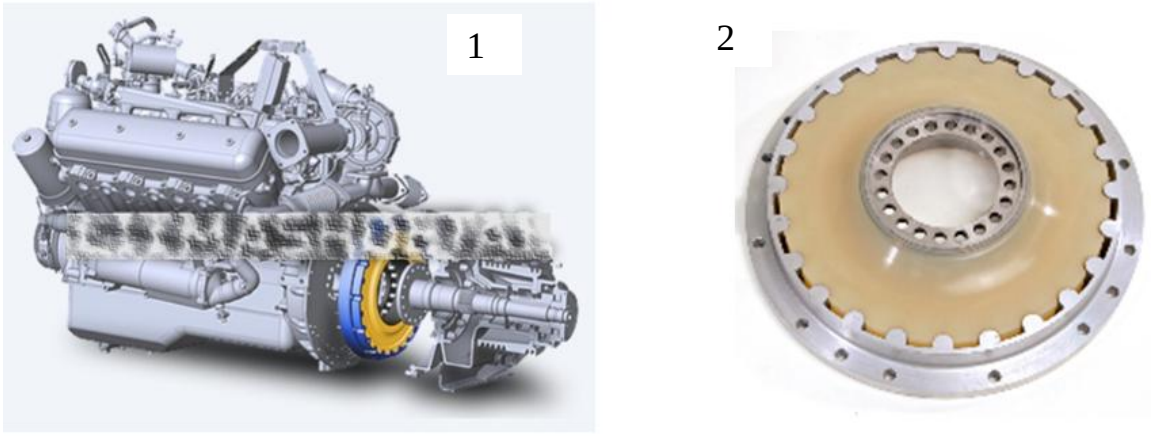


Рис. 1. Муфта LMD в агрегате - 1, общий вид муфты LMD - 2 .

Очевидная простоты конструкции, низкая стоимость, высокий уровень ремонтопригодности и надежности в тяжелых условиях эксплуатации обеспечили коммерческую популярность этих изделий. Они поставляются в широком диапазоне крутящего момента до 10000 Нм для передачи энергии от маховика дизеля до потребителя.

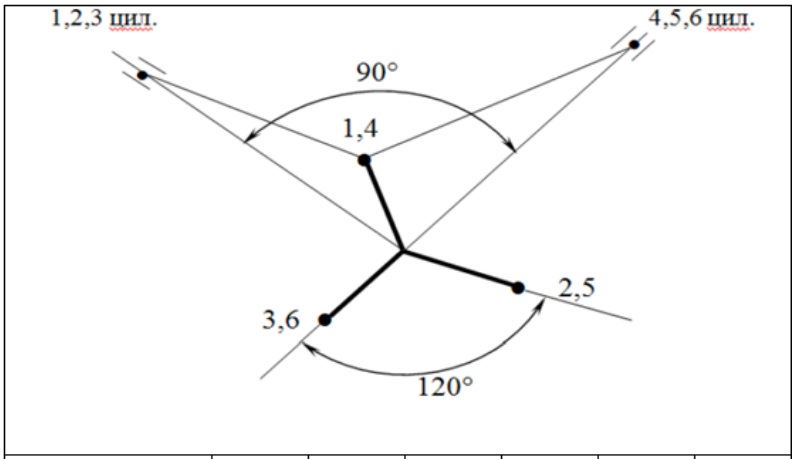
Расчетно-экспериментальные исследования и опыт эксплуатации выявили ряд эксплуатационных преимуществ муфт LMD. Высокая стойкость силикона, из которого изготовлен упругий элемент муфты, позволяет работать технике даже при вытекании масла из редуктора. Эластичные свойства этого материала обеспечивают компенсацию заметных смещений валов при сборке: радиальные – не менее 0.5 мм, осевые - до 5 мм и угловые - до 0.3^{o}.

Известно, что главное назначение упругих муфт вообще и муфт LMD, в частности, заключается в защите привода от не допустимых крутильных колебаний на всех режимах их использования. При проектировании задача сводиться к грамотному обоснованию такой динамической жесткости муфты, при которой наиболее опасные резонансы соответствующей формы свободных колебаний не попадали бы в рабочий диапазон частоты вращения. При этом эластичная муфта сама становится наиболее нагруженным элементом системы и при исследовании крутильных колебаний необходи-

мо учитывать ее нелинейные свойства и опасные режимы работы, например, при нарушении равномерной подачи топлива в цилиндры дизеля.

Все эти задачи были успешно и оперативно решены для нескольких проектов силовых установок по оригинальным алгоритмам и программам монографии [1] в редакторе MathCAD. Далее показаны основные результаты этих исследований на примере силовой установки автогрейдера с дизелем ЯМЗ – 236 (мощностью 169 Вт при 2100 об/мин) и муфтой LMD.

Двигатель – четырехтактный, шестицилиндровый, V – образный с углом расположения осей цилиндров в отсеке, равным 90^0. На рис. 2 приведены данные, необходимы для расчета возмущающих моментов



Цилиндры	1	4	2	5	3	6
	720	630	480	390	240	150
Отсеки	1+4 под 90^0		2+5 под 90^0		3+6 под 90^0	
	720		480		240	

Рис. 2. Порядок работы и углы опережения относительно 1-го цилиндра

Двигатель работает по нагрузочной характеристике в диапазоне крутящего момента от 770 до 882 Нм. Холостой ход - 650…700 об/мин.

Исходными данными для расчетной схемы системы послужили фирменные сведения о моментах инерции масс и жесткостях участков их соединений в дизеле с маховиком, размеры потребителя энергии и зависимости жесткости муфты от нагрузки (с возможностью варьирования).

По этим данным в соответствие с принятой методикой [1] составлена безразмерная системы вращающихся масс (БСВМ), где в качестве ее постоянных параметров приняты момент инерции кривошипно-шатунного механизма дизеля $\Theta_0 = 0.204$ нм^2 и податливость одного колена коленчатого вала между отсеками $E_0 = 3.77358*10^{-7}$ рад/нм.

Отсюда коэффициент перехода к размерной частоте свободных колебаний составит $a = 30/\pi\sqrt{\Theta_0 E_0} = 34425.932$.

Таким образом, получена восьми массовая, неразветвленная БСВМ, показанная в первых четырех столбцах таблицы 1, где i - номер массы, δ_i -

безразмерный момент инерции i – й массы, $E_{i,i+1}$ - безразмерная податливость (i, i+1) – го участка системы. Пятый столбец содержит $W_{i,i+1}$ - момент сопротивления сечения тех же участков, коэффициенты демпфирования на массах Km_i и в соединениях $Ks_{i,i+1}$, определенные по методике [1] и предназначенные для оценки резонансных напряжений в системе.

i	Название	δ_i	$E_{i,i+1}$	$W_{i,i+1}$	Km_i	$Ks_{i,i+1}$
1	Демпфер	0.066	1.31	1	4	0
2	Масса	0.299	1.29	339.292	0.005	0
3	Отсек 1 (1+4)	1.049	1	339.292	1.509	0.001
4	Отсек 2 (2+5)	1	1	339.292	1.509	0.001
5	Отсек 3 (3+6)	1	0.603	339.292	1.509	0.001
6	Маховик + венец	13.183	$E_{6,7}$	1	0.005	0.2
7	Венец 2	1.03	1.221	339.292	0.005	0.001
8	Потребитель	0.252	0	339.292	1	0

Важно отметить, что система имеет нелинейную податливость $E_{6,7}$ муфты, которая зависит от нагрузки дизеля. Для холостого хода, в первом приближении, установлена безразмерная податливость $E_{6,7}$ = 662.5 при крутящем моменте 150 Нм и жесткости муфты 4000 Нм/рад..

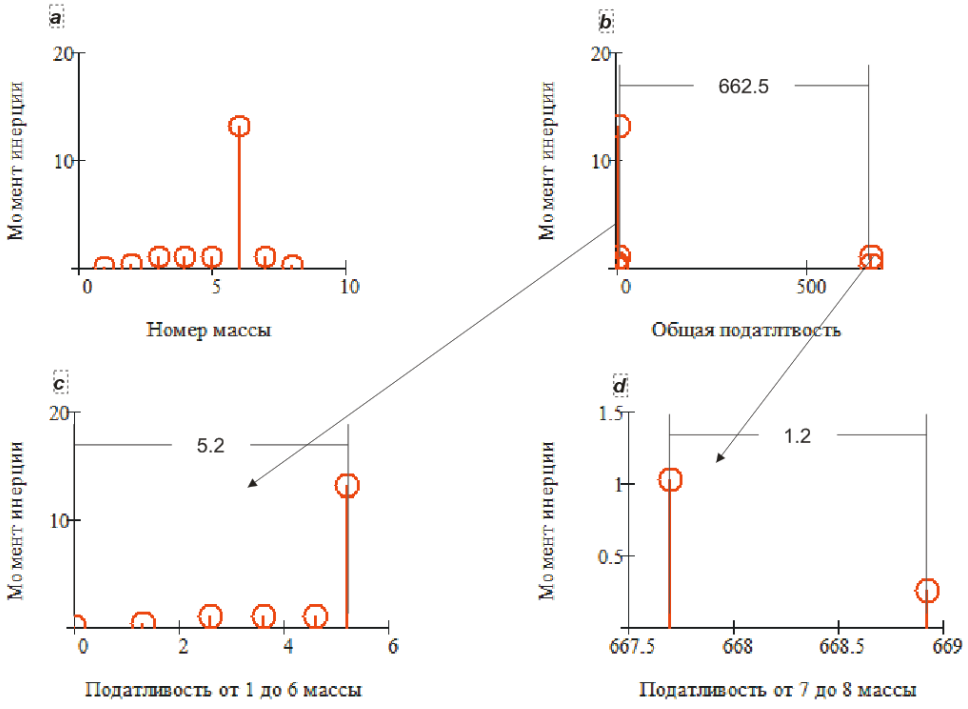


Рис. 3. БСВМ : a - от номера массы, b - от общей податливости, c- от податливости в пределах от 1 до 6 массы ,d - от податливости в пределах от 7 до 8 массы.

Рис. 3, на котором показано несколько участков БСВМ, позволяет продемонстрировать важное свойство установок с муфтами LMD – очень

большую относительную податливость на участке между маховиком и потребителем энергии. Хорошо видно, что значение $E_{6,7} = 662.5$ во много раз больше участков на краях системы (5.2 и 1.2). Такие соотношения характерны для большинства установок с подобными муфтами, что позволяет применить принцип слияния близких масс для образования условной двух массовой системы с целью приближенной оценки частоты свободных колебаний (ЧСК) «муфтовой» формы [1]. В данном случае эту величину можно определить по формуле

$$\Delta = \frac{1}{E_{6,7}}\left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{6}\vartheta_i} + \frac{1}{\sum_{i=7}^{8}\vartheta_i}\right) = 1.268\cdot 10^{-3},\ N = a\sqrt{\Delta} = 1226.04\,кол/мин. \quad (1)$$

Частота практически совпала с результатами точного расчета методом Хольцера [1] одноузловой формы всей системы, показанных на эпюрах относительных амплитуд свободных колебаний (рис. 4). Тем не менее, этот простой способ не может заменить полного расчета.

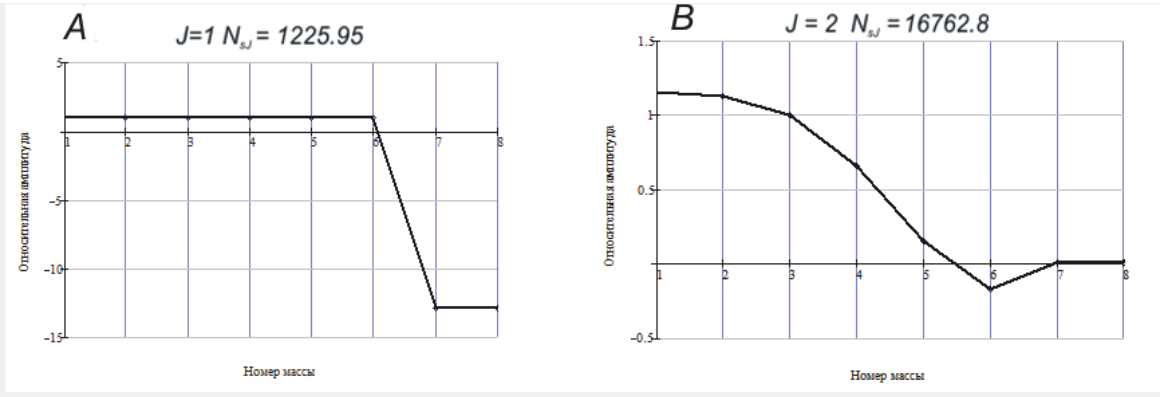


Рис. 4. Формы свободных колебаний. А – одноузловой (муфтовой) формы, В – двухузловой (моторной) формы.

Только полный расчет позволяет выявить развитие колебаний всех форм. В данном случае кроме этой «муфтовой» формы при ЧСК 1226 кол/мин (Рис. 4, А), возникает двухузловая «моторная» форма при частоте 16763 кол/мин с напряжениями в коленчатом валу (рис. 4,В). Для их гашения на дизель устанавливается демпфер (две первые массы БСВМ). Проверка расчетом показала приемлемую эффективность демпфера для гашения резонансов 7.5 – го и 9 – го порядков в районе номинальных оборотов.

Однако основное внимание было уделено анализу развития «муфтовой» формы колебаний с учетом ее нелинейной характеристики при двух вариантах состояния дизеля – при нормальной его регулировке и при аварийном отключении одного отсека или цилиндра.

Алгоритмы расчета крутильных колебаний содержат следующие основные этапы [1].

1. Расчет свободных колебаний по методу Хольцера. Пример показан на рис. 4.
2. Векторный анализ возмущающих моментов на массах отсеков (после подсчета суммарного вектора каждого отсека) путем расчета так называемой «Суммы альфа». Пример результатов анализа показан на рис. 5.
3. Оценка резонансных амплитуд крутильных колебаний всех порядков, включающих в себя расчеты работы возмущающих моментов, демпфирующих моментов на массах и в соединениях с учетом коэффициентов демпфирования по табл. 1.
4. Расчет и построение графиков вынужденных и резонансных амплитуд эластических моментов и сравнение их с допустимыми моментами, которые приняты равными 1/3 величины крутящего момента.

Сначала рассмотри основные результаты исследования при нормальной регулировке двигателя для варианта максимального момента 882 Нм, которому соответствует динамическая жесткость муфты 6900 Нм/рад и безразмерная податливость $E_{6,7}$ = 384. При этом ЧСК составила N = 1600 кол/мин. Векторный анализ показал, что для этого V - образного шестицилиндрового дизеля к основным следует отнести гармоники 1.5 – го порядка и кратных ему порядков (см. рис. 5).

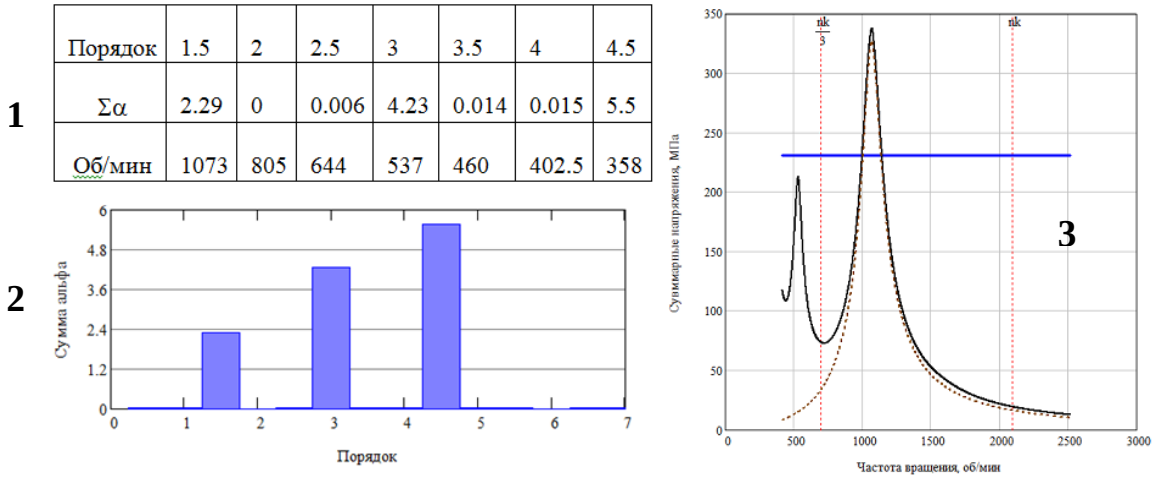


Рис. 5. Развитие крутильных колебаний муфты при жесткости 6900 Нм/рад . Таблица гармоник – 1, гистограмма гармоник – 2, развитие суммарных амплитуд колебаний муфты - 3

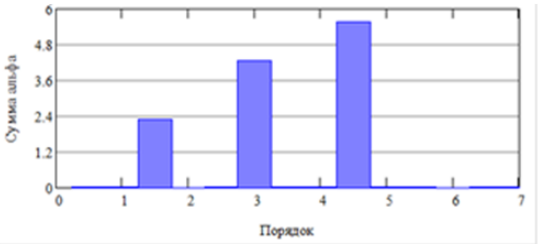
Данные рис. 5 позволяют сделать вывод о неудовлетворительном развитии колебаний при жесткости муфты 6900 Нм/рад. Для обеспечения ее надежной работы необходимо изготовить новую муфту, жёсткость которой обеспечивала бы расположение резонанса 1.5- го порядка примерно на 10% ниже холостых оборотов 650 об/мин. Эту задачу можно просто решить по

уравнению (1) относительно податливости $E_{6,7}$, которая составила 384 единиц, что соответствует жёсткости 2050 Нм/рад. Расчеты показали, что в этом случае опасный резонанс сместился на 585 об/мин и рабочий диапазон оборотов оказался свободным от запретных зон.

1

Порядок	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
Σα	2.29	0	0.002	4.24	0.004	0.004	5.54
Об/мин	585.	439	351	292.5	251	219	195

2



3

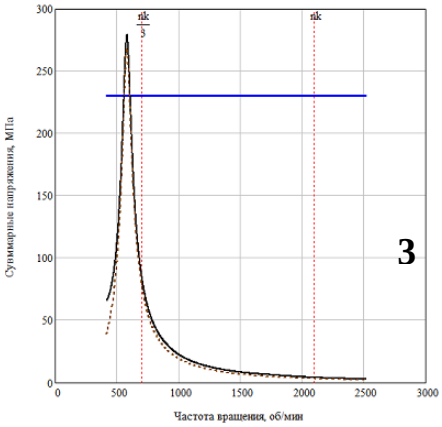
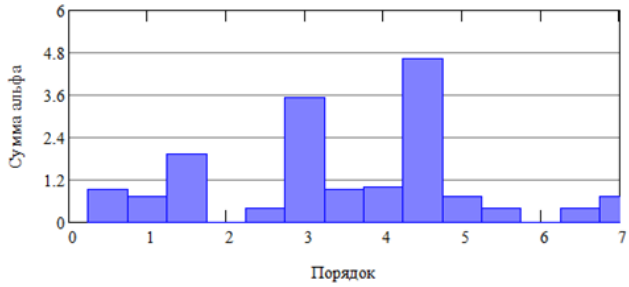


Рис. 6. Развитие крутильных колебаний муфты при жесткости 2050 Нм/рад. Таблица гармоник – 1, гистограмма гармоник – 2, развитие суммарных амплитуд колебаний муфты – 3

Оригинальная методика оценки крутильных колебаний [1] позволяет оценить развитие колебаний в случае нестабильной работы цилиндров двигателя, например по причине отключения одного из цилиндров. Как видно из рис. 7 это привело к возникновению ряда не главных гармоник и более сложной картине суммарных амплитуд. Хотя нагрузки оказались меньше допустимой величины, все же рекомендуется не нарушать правила эксплуатации дизеля.

Порядок	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
Σα	1.91	0	0.38	3.53	0.92	1	4.61
Об/мин	585.	439	351	292.5	251	219	195



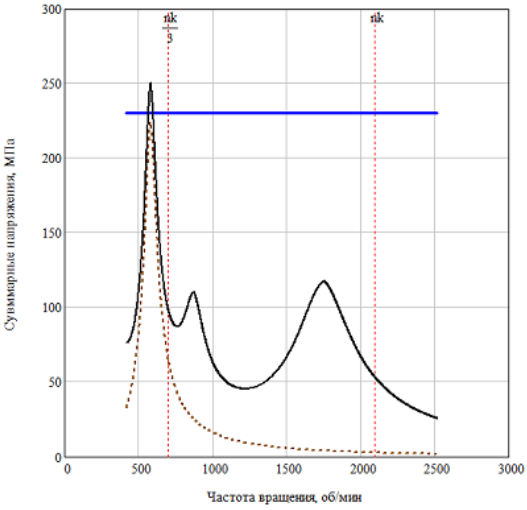


Рис. 7. Развитие крутильных колебаний муфты при жесткости 2050 Нм/рад и при работе с одним отключенном цилиндром

В заключение целесообразно отметить, что предложенная методика позволяет объективно оценивать динамические нагрузки для муфт типа LMD и решать проблему выбора их параметров, гарантирующих возможность нормальной работы дизеля в рабочем диапазоне оборотов.

Вместе с тем имеется еще не решенная проблема оценки динамической жесткости муфт путем создания специального стенда, поскольку применяемая фирмой методика пересчета результатов статических испытаний муфт отечественной и немецкой постройки представляется недостаточно корректной.

Требует дальнейшего развития экспериментальные методы контроля крутильных колебаний муфт в составе агрегата. Наиболее доступными можно считать бесконтактные тепловые методы диагностики (телевизоры, пирометры и т.п.) при условии разработки и применения соответствующих программ и алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. — СПб.: Наука, 2007. — 276 с.
2. ЛИТМАШДЕТАЛЬ. URL: www.lmdcoupling.ru (дата обращения: 13.03.2013).

УДК 621.89.012

А.Г. Железнов

КИНЕТИКА АДСОРБЦИИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА С ТРИБОАКТИВНЫМИ ПРИСАДКАМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ТРЕНИЯ



Антон Геннадьевич Железнов, магистрант,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия.
Тел. 8-925-344-09-78, E-mail: antoniron@smtp.ru

Аннотация

В работе рассмотрена теория изменения концентрации присадок в объёме смазочного материала в результате их адсорбции поверхностями трения.

Ключевые слова: присадки, адсорбция, десорбция.

A.G. Zheleznov

ADSORPTION KINETICS OF THE LUBRICANT WITH TRIBOAKTIVE ADDITIVES BY THE FRICTION SURFACES

Anton G. Zheleznov, National Research Nuclear University MEPhI,
Russia, e-mail: antoniron@smtp.ru

Abstract

This article is considered to the theory of additives concentration change in lubricant volume as a result of adsorption of additives by friction surfaces.

Key words: additives, adsorption, desorption.

Введение

Адсорбция молекул присадок играет существенную роль в процессе трения, так как создаёт необходимую повышенную концентрацию молекул присадок в зоне фрикционного контакта. Кинетика формирования и структура адсорбционного слоя в различных аспектах исследована достаточно подробно в работах [1, 2, 6], однако в них основное внимание уделено структурному состоянию поверхности и механизмам формирования адсорбированных слоёв на поверхностях трения. Изменение же состава самого смазочного материала изучено недостаточно, в связи с

чем представляется интересным рассмотрение вопроса об изменении состава смазочного материала в процессе трения.

Постановка задачи

Под трибоактивными присадками будем понимать химические соединения, вводимые в качестве присадок в смазочный материал, способные к формированию физически или химически адсорбированных слоёв на поверхностях трения и улучшающие триботехнические характеристики смазочного материала.

Уравнения кинетики адсорбции отражают физико-химическую природу адсорбционного процесса и устанавливают временную связь между концентрациями веществ в составе адсорбента и подвижной фазе [4]. Кинетика адсорбции какого-либо *i*-го компонента зависит от следующих основных независимых факторов [5]: от концентрации всех компонентов как в составе подвижной фазы, так и в составе адсорбента; от параметров, определяющих диффузионную стадию процесса адсорбции (скорость потока, температура и плотность подвижной фазы); от параметров, определяющих химическую стадию кинетики адсорбции (непосредственное взаимодействие адсорбента и взаимодействующих частиц).

Особенность уравнений изотерм адсорбции – отсутствие многих параметров, от которых зависит кинетика адсорбции, например параметров, определяющих диффузию. В уравнениях изотерм адсорбции содержатся только параметры, характеризующие энергию взаимодействия адсорбата и адсорбента [5].

Рассмотрим вопрос об изменении с течением времени концентрации введённой в смазочный материал трибоактивной присадки в изотермических условиях трения.

Скорость изменения концентрации *i*-ой трибоактивной присадки в объёме смазочного материала в зоне трения однородных материалов в изотермических условиях представим в виде уравнения баланса:

$$\frac{d\mathrm{C}}{dt} = -R_a + R_d - R_t, \qquad (1)$$

где R_a – темп адсорбции, R_d – темп десорбции, R_t – темп термического разложения *i*-ой трибоактивной присадки в смазочном материале.

При определении темпов адсорбции, десорбции и термического разложения будем учитывать следующие предположения:

1. примем, что состав смазочной композиции оптимизирован таким образом, что присадки, вводимые в неё, термически стойки в тех условиях трения, для которых предназначен рассматриваемый смазочный материал. Поэтому вероятность процесса химического разложения присадки мала, что позволяет нам устремить к нулю темп термического разложения присадки R_t;

2. темпы адсорбции и десорбции прямо пропорциональны плотности активных поверхностных адсорбционных состояний в зоне фрикционного контакта *N*;

3. темпы адсорбции и десорбции прямо пропорциональны вероятностям адсорбции и десорбции, которые, в соответствии с [3], аппроксимируются температурными зависимостями типа активационной зависимости Аррениуса:

$$P_a = K_a e^{-\frac{E_a}{kT}};\ P_d = K_d e^{-\frac{E_d}{kT}}, \quad (2)$$

где E_a, E_d – энергии активации адсорбции и десорбции соответственно;

4. темп адсорбции пропорционален вероятности того, что данное активное поверхностное адсорбционное состояние *n* в зоне фрикционного контакта свободно, которая, в свою очередь, пропорциональна текущей объёмной концентрации *i*-ой трибоактивной присадки C;

5. темп десорбции пропорционален вероятности того, что данное активное поверхностное адсорбционное состояние в зоне фрикционного контакта *n* занято, которая, в свою очередь, пропорциональна разности между начальной и текущей объёмными концентрациями *i*-ой трибоактивной присадки $(\mathrm{C}_0 - \mathrm{C})$.

Исходя из вышеизложенного, темпы адсорбции и десорбции могут быть записаны в виде:

$$R_a = \alpha N P_a C,\ \ R_d = \beta N P_d (C_0 - C), \quad (3)$$

где α и β – размерные коэффициенты адсорбции и десорбции соответственно.

С учётом выражений (3) и предположения 1 уравнение изотермы концентрации (1) примет вид:

$$\frac{d\mathrm{C}}{dt} = -\alpha N P_a C + \beta N P_d (C_0 - C) \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4) с начальным условием $\mathrm{C}(t=0) = C_0$, получим выражение для изотермы концентрации *i*-ой трибоактивной присадки в объёме смазочного материала в зоне трения однородных материалов в виде:

$$\mathrm{C}(t) = C_0 \left\{ \frac{\beta P_d}{\alpha P_a + \beta P_d} + \frac{\alpha P_a}{\alpha P_a + \beta P_d} e^{-(\alpha P_a + \beta P_d) N t} \right\} \quad (5)$$

Обсуждение результатов

При достаточно больших временах процесса трения устанавливается динамическое равновесие процессов адсорбции и десорбции, в результате чего стационарная объёмная концентрация *i*-ой трибоактивной присадки, в соответствии с уравнением (5), оказывается равной:

$$\mathrm{C}_s = C_0 \frac{\beta P_d}{\alpha P_a + \beta P_d} \quad (6)$$

и зависит от микроскопических параметров процессов адсорбции-десорбции для конкретных адсорбента и адсорбата.

Введём параметр запаса трибологической активности i-ой трибоактивной присадки в объёме смазочного материала следующим образом:

$$Z = \frac{\alpha P_a + \beta P_d}{\beta P_d} \tag{7}$$

При проведении оптимизации состава смазочного материала по параметру концентрации вводимой трибоактивной присадки следует понимать, что её стационарная концентрация в Z раз меньше, чем изначально введённая. Параметр запаса трибологической активности присадки является количественной вероятностной характеристикой сорбционных процессов и зависит от физико-химической природы поверхностей трения, присадки и специфического взаимодействия молекул присадки с матричным смазочным материалом.

Таким образом, уравнение изотермы концентрации (5), с учётом введённого параметра (7) примет вид:

$$\mathrm{C}(t) = C_0 \left\{ \frac{1}{Z} + \frac{Z-1}{Z} e^{-\frac{t}{\tau}} \right\}, \tag{8}$$

где введено обозначение $\tau = \frac{1}{Z\beta P_d N}$.

В уравнении (8) первое слагаемое представляет собой стационарную объёмную концентрацию введённой присадки, а второе – активную действующую объёмную концентрацию, отвечающую формированию граничного адсорбированного молекулярного слоя, снижающего интенсивность фрикционного взаимодействия.

Параметр $\tau = \frac{1}{Z\beta P_d N}$ представляет собой характерное время убывания активной действующей объёмной концентрации и является характеристикой формирования граничного смазочного адсорбционного слоя.

В соответствии с уравнениями (2) запас трибологической активности Z будет иметь вид:

$$Z = 1 + \gamma e^{-\frac{E_a - E_d}{kT}}, \tag{9}$$

где введено обозначение $\gamma = \frac{\alpha K_a}{\beta K_d}$ – микроскопический параметр динамического равновесия процессов адсорбции-десорбции.

В отсутствии убедительных данных о том, что стационарная объёмная концентрация C_s много меньше изначально введённой концентрации C_0, второе слагаемое в уравнении (9) может быть разложено в ряд по малому параметру $\frac{E_a - E_d}{kT}$. Тогда запас трибологической активности Z запишется как:

$$Z = 1 + \gamma \left(1 - \frac{E_a - E_d}{kT} \right)$$

С учётом выражения (9) уравнение изотермы адсорбции (8) примет вид:

$$C(t) = C_0 \left\{ \frac{1}{1+\gamma e^{-\frac{E_a - E_d}{kT}}} + \frac{e^{-\frac{t}{\tau}}}{1+\frac{1}{\gamma} e^{\frac{E_a - E_d}{kT}}} \right\} \quad (10)$$

Таким образом, полученное выражение (10) характеризует изотермическую кинетику изменения объёмной концентрации трибоактивной присадки в зоне трения через микроскопические параметры процессов адсорбции и десорбции для заданных адсорбента и адсорбата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Волков А.В. Процесс формирования физически адсорбционного граничного смазочного полимолекулярного слоя. «Техника и технология трибологических исследований». Иваново. – 2006. – С. 37 – 42.
2. Волков А.В. Математическое моделирование смазочного действия СОТС при лезвийном резании. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Иваново, ИвГУ, 1996. — 18 с.
3. С.Е. Кожабаев, В.Г. Голубев, А.М. Бренер. Вероятностная модель фракционирования ультрадисперсных суспензий в приповерхностной зоне слоя пористого адсорбента [Электронный ресурс] // Вестник Казахского Национального технического университета им. К.И. Сатпаева. 2010. №3(79). URL: http://vestnik.kazntu.kz/?q=ru/node/524 (дата обращения: 26.03.13).
4. Тимофеев Д.П. Кинетика адсорбции. – М.: Издательство АН СССР, 1962. – 252 с.
5. Товбин Ю.К. Молекулярная теория адсорбции в пористых телах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 624 с.
6. Фукс Г.И. Исследование влияния состава граничных слоев на коагуляционные и фрикционные взаимодействия и улучшение смазочных материалов. – М.: Наука, 1965. – 101 с.

УДК 620

В.А. Жуков

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ



Владимир Андреевич Жуков, д.т.н., проф.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, профессор кафедры «Машиноведение и основы конструирования»;
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия.
Тел.: (812)552-6429, e-mail: v.zhukoff2011@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы, связанные с исследованием влияния малых пластических деформаций на усталостную прочность титановых сплавов. Установлено, что снижение усталостной прочности титановых сплавов может иметь место при остаточных деформациях от 0,1% до 1% в зависимости от структуры материала и его статической прочности.

Ключевые слова: титановый сплав, усталостная прочность, пластическая деформация.

V.A. Zhukov

INFLUENCE OF PLASTIC DEFORMATION ON FATIGUE OF TITANIUM ALLOYS

Dr.Sc., Professor Vladimir A. Zhukov
St.Petersburg Polytechnical University,
Professor of Department «Machinery and fundamentals of machine design»
Polytechnicheskaya, 29, St-Petersburg, 195427, Russia
Phone: (812)552-6429; e-mail: v.zhukoff2011@yandex.ru.

Abstract

In work the questions connected with research of influence of small plastic deformation on fatigue of titanium alloys. It is determination that there is reduction of fatigue of titanium alloys after plastic deformation from 0,1 to 1 percent depending on material structure and the strain resistance.

Key words: titanium alloy, fatigue of metals, plastic deformation.

Благодаря высокой коррозионной стойкости титановых сплавов в кислородосодержащих средах и механической прочности при удельном весе в 1,7 раза меньшем, чем у сталей, расширяется область применения этих сплавов в различных отраслях машиностроения. Хотя основными потребителями титановых сплавов в настоящее время остаются космонавтика, авиация и двигателестроение [1], активно ведутся исследования и опытные разработки с целью более широкого применения титановых сплавов в энергетическом машиностроении и для средств морской нефте- и газодобычи, а также гидростроительства.

Наряду с технологическими трудностями использования титановых сплавов в качестве конструкционных материалов необходимо учитывать некоторые особенности конструктивной прочности этих сплавов. При расчётных напряжениях порядка (0,6 … 0,7)σ_T в области климатических температур имеет место ползучесть титановых сплавов. Сопротивление разрушению средне- и высокопрочных сплавов существенно снижается в водных растворах хлоридов при наличии острых концентраторов и трещин [2]. В среднем в 1,5 раза уменьшается предел выносливости деталей из титановых сплавов в результате шлифования [3]. Обнаружено существенное снижение сопротивления переменным напряжениям в результате активного растяжения и ползучести. Остаточная деформация ползучести, накопленная при статическом растяжении за время, соответствующее 0,01% от времени до разрушения, снижает предел выносливости титанового сплава на 40% от значения предела выносливости предварительно недеформированных образцов [4]. Последнее обстоятельство означает, что при одновременном действии постоянной нагрузки, вызывающей ползучесть, и переменных напряжениях может существенно повыситься вероятность усталостного разрушения деталей в эксплуатации.

В данной работе представлены результаты исследования влияния малых пластических деформаций на усталостную прочность титановых сплавов. Испытания проводились при симметричном цикле изменения напряжений по схеме чистого изгиба. Образцы диаметром 8 мм и 25 мм изготавливались из материала пластин, подвергавшихся холодной гибки. Испытывались также образцы после испытаний их на ползучесть или после растяжения с остаточной деформацией от 0,1 до 5%.

На рис. 1 представлены результаты испытания образцов диаметром 8 мм, вырезанных из заготовок сплава ВТ8 в исходном состоянии (после горячей обработки давлением), в состоянии после холодной гибки с остаточной деформацией поверхностного слоя 2,5%, а также после гибки и последующего выпрямления заготовок.

В результате холодной гибки предел выносливости образцов уменьшился на 30% по сравнению с исходным состоянием: с 430 до 320 МПа образцов из заготовок толщиной 25 мм и с 300 до 210 МПа образцов

из заготовок толщиной 46 мм. Не обнаружено заметного отличия усталостной прочности образцов, вырезанных из растянутой области заготовок, и образцов, вырезанных из сжатой области заготовок. Пластическая деформация заготовок обратного знака при выпрямлении не способствует восстановлению усталостной прочности.

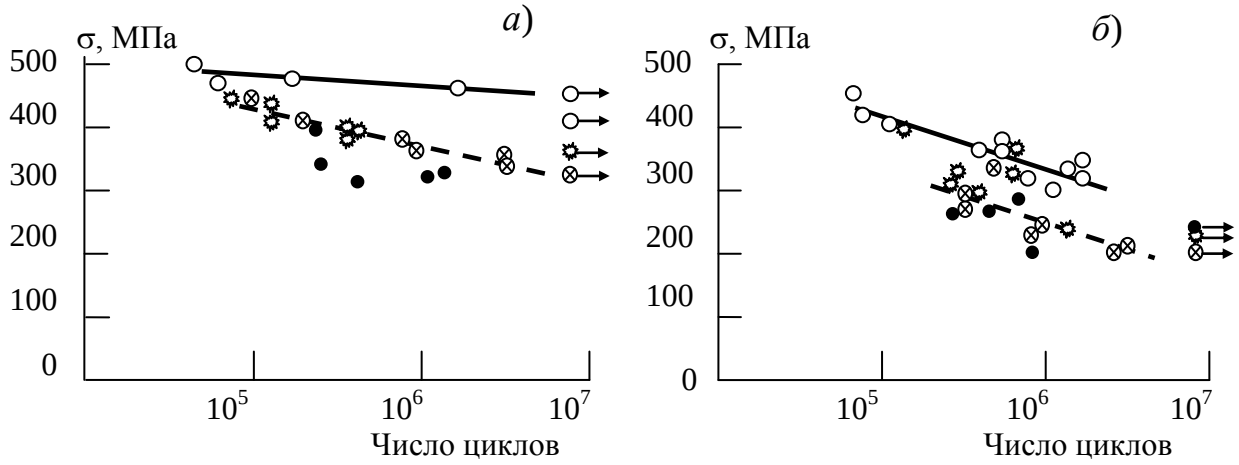


Рис. 1. Усталостная прочность сплава ВТ8;
образцы изготовлены из материала пластин толщиной 25 мм (*а*) и 46 (*б*) мм:
○ – исходное состояние; ✿ – после гибки с остаточной деформацией 2,5% (область растяжения); ⊗ – то же (область сжатия); ● – после гибки и последующего выпрямления заготовок

Результаты испытания образцов диаметром 8 мм и 25 мм, вырезанных из заготовок толщиной 100 мм сплава ПТ3В, позволяют сделать следующее заключение. Влияние масштабного фактора на предел выносливости образцов, вырезанных из материала заготовок в исходном состоянии или после гибки заготовок, не обнаруживается. Предел выносливости материала в исходном состоянии 250 МПа, а после гибки с остаточной деформацией 2% – 140 МПа. Отжиг 870°С в течение 2 часов приводит лишь к частичному восстановлению усталостной прочности; предел выносливости после отжига 190 МПа.

На рис. 2 представлены результаты испытания образцов диаметром 8 мм, вырезанных из заготовки сплава ВТ8 толщиной 60 мм. Остаточная деформация при растяжении 0,5% вызвала снижение предела выносливости с 360 МПа недеформированного состояния до 200 МПа после деформирования. Вакуумный отжиг образцов после их растяжения не привёл даже к частичному восстановлению усталостной прочности. Однако после механической обработки со снятием припуска 0,5 мм на диаметр усталостная прочность предварительно деформированных образцов была полностью восстановлена до уровня усталостной прочности недеформированных образцов.

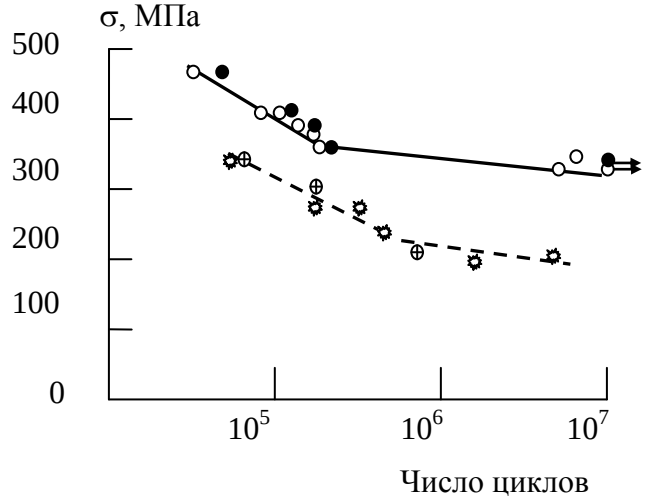


Рис.2. Усталостная прочность образцов сплава ВТ8
предварительно пластически деформированных растяжением:
○ – исходное состояние; ⊕ – остаточная деформация 0,5%;
✿ – то же + вакуумный отжиг; ● – то же + механическая обработка

Значение пластической деформации образцов перед усталостными испытаниями, вызывающей снижение предела выносливости, существенно зависит от размеров заготовки (рис. 3). В результате остаточной деформации 0,5% предел выносливости материала пластина толщиной 14 мм сплава ВТ8 (диаметр зерна 0,05 мм) остаётся равным пределу выносливости недеформированного материала. Напротив, предел выносливости материала пластина толщиной 60 мм этого же сплава (диаметр зерна 0,25 мм) при снижается на 40% от исходного. А предел выносливости материала заготовок сплава ВТ8 после прокатки в β - области (величина зерна 1,5 мм) резко снижается при остаточной деформации всего 0,1 %.

Характерно, что предварительная пластическая деформация оказывает меньшее влияние на сплав ПТ7М по сравнению со сплавом ПТ3В, имеющим более высокое значение предела текучести.

Влияние размера зерна обнаруживается также при испытании образцов, подвергнутых механической обработке после пластического деформирования. Так, предел выносливости образцов сплава ВТ8 (пластина толщиной 14 мм, размер зерна 0,05 мм), деформированных на 1% и подвергнутых полированию со снятием припуска 0,05 мм, даже несколько превысил предел выносливости образцов из материала в исходном состоянии. Снятие припуска 0,5 мм практически восстановило (до 85%) предел выносливости образцов сплава ВТ8 (пластина толщиной 60 мм, размер зерна 0,25 мм). Однако снятие припуска 3 … 5 мм не привело к повышению предела выносливости предварительно деформированных образцов этого сплава, изготовленных из материала заготовки, подвергнутой прокате в β - области (размер зерна 1,5 мм).

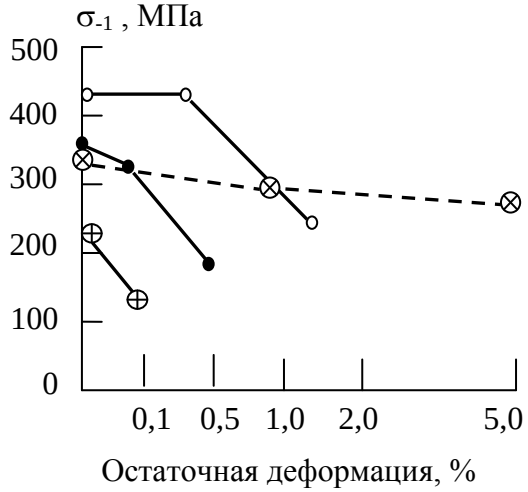


Рис. 3. Влияние пластической деформации образцов на предел выносливости:
○ – сплав ВТ8, пластина 14 мм, размер зерна 0,05 мм;
● – сплав ВТ8, пластина 60 мм; размер зерна 0,25 мм;
⊕ – сплав ВТ8, проката в β - области, размер зерна 1,5 мм.
⊗ – сплав ПТ7М, пруток ∅ 16 мм

Обсуждение результатов

Негативное влияние повреждений титановых сплавов, возникающих в процессе пластической деформации порядка одного процента, не устраняется или устраняется лишь частично последующим отжигом. Это свидетельствует о том, что данные повреждения являются необратимыми и могут рассматриваться как микротрещины.

Считается, что основным механизмом пластической деформации титановых сплавов при активном деформировании в области температур ниже температуры рекристаллизации является скольжение дислокаций. Напряжение в вершине группы из n дислокаций, находящихся в одной и той же плоскости скольжения и задержанных границей зерна, оценивается величиной τn, где τ – касательное напряжение от действия внешних нагрузок. Нормальное напряжение растяжения при сдвиге равно $\sigma = \tau$. В данном случае условие образования субмикротрещины в вершине полосы сдвига можно записать в виде $\sigma_f = \tau n_f$, где σ_f – теоретическая прочность при растяжении, принимается порядка $0{,}1E$; n_f – число задержанных границей дислокаций в плоскости сдвига в момент образования субмикротрещины. Так как напряжение σ_f, по крайней мере, на порядок больше внешнего напряжения σ, то субмикротрещины могут образоваться как при растяжении заготовок, так и при сжатии. Дислокации, «стекая» в образовавшуюся полость субмикротрещины, способствуют увеличению её до размеров микротрещины (рис. 4), обнаруживаемой при 500-кратном оптическом увеличении и сопоставимой с размерами микроструктурных составляющих сплава.



Рис. 4. Повреждения на поверхности
образца после растяжения
(остаточная деформация 1,5%,
увеличение 500)

Является ли снижение усталостной прочности при малых пластических деформацией свойственным только титановым сплавам? По сравнению с конструкционными сталями с ОЦК – решёткой при малых пластических деформациях титановых сплавов с ГПУ – решёткой отмечена значительно более высокая степень неоднородности распределения остаточной деформации между микрообъёмами. Вероятно, высокой локализацией пластического течения в титановых сплавах объясняется интенсивное подрастание единичных субмикротрещин в процессе пластического деформирования до размеров микротрещины, которая способна в дальнейшем увеличиваться под действием переменных напряжений. Согласно этой модели следует ожидать, что влияние малых пластических деформаций в большей степени будет проявляться в случае титановых сплавов повышенной прочности и при наличии крупнозернистой структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г.А. Филиппов, А.С. Лисянский, О.И. Назаров, Ю.П. Томков. Направление совершенствования быстроходных паровых турбин АЭС // Энергетические машины и установки. – 2008. – №3, С.3–12.
2. B.F. Brown. Material Research and Standards, 1966. – V.6, P.3–129.
3. Н.Д. Кузнецов. Обеспечение надёжности современных авиадвигателей //Проблемы надёжности и ресурса в машиностроении. – М.: Наука, 1988. – С. 51–86.
4. Жуков В.А., Маринец Т.К. Оценка влияния пластической деформации на повреждаемость материалов по характеру изменения усталостной прочности //Прочность металлов при циклических нагрузках / отв. ред. В.С. Иванова. – М., 1967. С.77–82.

УДК 621.833.6

С.В. Колмаков

СИЛОВОЙ АНАЛИЗ БЕЗВОДИЛЬНЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ С ОДНОЗВЕННЫМИ И ДВУХЗВЕННЫМИ САТЕЛЛИТАМИ



Станислав Витальевич Колмаков, аспирант
Курганский государственный университет
ул. Гоголя, 25, Курган, 640669, Россия
Тел.: 8-912-522-7047, E-mail: stas160487@yandex.ru.

Аннотация

В статье рассмотрена конструкция безводильной планетарной передачи, содержащей принципиально новый структурный модуль – двухзвенный сателлит. Решены задачи силового анализа новой передачи и известной безводильной передачи с сателлитами, венцы которых соединены в единое звено.

Ключевые слова: безводильная планетарная передача, двухзвенный сателлит, передаточное отношение, структура механизма, силовой анализ.

S.V. Kolmakov

POWER ANALYSIS OF THE PLANETARY GEARS WITHOUT CARRIER WITH ONE AND WITH DOUBLE SATELLITES

Stanislav V. Kolmakov, Kurgan State University, Russia,
e-mail: stas160487@yandex.ru

Abstract

The article describes the construction of the planetary gear without carrier containing fundamentally new structural unit - double satellite. The problems of power analysis of the new gear and known planetary gear without carrier with satellites were resolved, the tooth rim of which are joined to form a single link.

Key words: planetary gear without carrier, double satellite, reduction ratio, structure of the mechanism, power analysis.

В машиностроении применяются передачи типа 3К [1], где основными звеньями являются три центральных зубчатых колеса. Такие передачи позволяют получить неограниченно большое передаточное отношение при малых габаритах. Водило в этих передачах может отсутствовать – так называемые, безводильные планетарные передачи (БПП). Для того чтобы пе-

редачи 3К, в том числе безводильные, имели максимальные передаточное отношение и нагрузочную способность, их сателлиты должны быть двухвенцовыми, т.е. содержать два зубчатых венца, развёрнутых друг относительно друга в окружном направлении, и, в общем случае, имеющих разные числа зубьев, а при необходимости, и модули.

Существуют следующие варианты обеспечения взаимного углового положения зубчатых венцов двухвенцовых сателлитов:

1) оба зубчатых венца принадлежат одной детали (например, SU 712043). Недостатками этого варианта являются сложность достижения необходимой точности углового позиционирования венцов и большое количество неидентичных деталей изделия (все сателлиты разные);

2) фиксация относительного углового положения венцов сателлитов происходит при монтаже с использованием сил трения. Примером планетарного механизма, со сборными сателлитами является передача, известная по патенту WAGNER, Gerard [WO 9205372] – рис. 1.

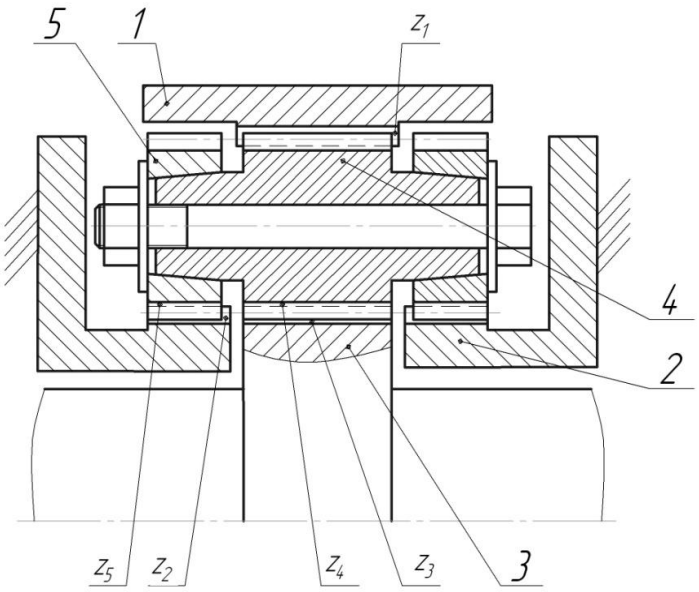


Рис. 1. Передача Вагнера [Патент WO 9205372]

Эта передача содержит ведущее центральное колесо 1 с внутренними зубьями (число зубьев z_1), неподвижное опорное центральное колесо 2 с наружными зубьями (z_2), выполненное с двумя венцами, разнесёнными друг относительно друга в осевом направлении, ведомое центральное колесо 3 с наружными зубьями (z_3), расположенное между этими венцами, соединенное с ведомым валом. Плавающие сателлиты, состоят из вала-шестерни 4 (z_4) и двух одинаковых боковых шестерен 5 (z_5), надетых на конусы вала-шестерни. Боковые шестерни 5 сателлитов зафиксированы с нужным относительным угловым смещением на конусах и стянуты болтом. Ведущее центральное колесо 1 взаимодействует с зубчатым венцом вала-шестерни 4 сателлита. Для выполнения условий сборки, числа зубьев

зубчатых колес редуктора связаны соотношением:

$$(z_3 + z_1) / K = C_{13}, \quad (1)$$

где K – число сателлитов; C_{13} – целое число.

На рис. 1 показана передача с числом сателлитов K = 12 и числами зубьев колёс: z_1=114, z_2=79, z_3=78, $z_4 = z_5 = z_c = 21$.

Передаточное отношение i^2_{13} от ведущего центрального колеса 1 к ведомому 3 вычисляется по формуле:

$$i^2_{13} = (1 + z_2 / z_1) / 1 - (z_2 / z_3). \quad (2)$$

В примере (рис. 1) $i^2_{13} = – 132{,}05$.

Недостатками подобных конструкций, являются сложность регулировки относительного углового положения зубчатых венцов сателлитов в процессе сборки, а также увеличенные осевые габариты редуктора за счёт резьбовых деталей.

Передача с двухзвенными сателлитами

Нами предложено [RU 2463499] конструктивное решение, которое лишено указанных недостатков, предусматривающее применение «двухзвенных сателлитов». «Двухзвенный сателлит» состоит из двух (или для симметрии трех) зубчатых колес, имеющих общую ось и свободу относительного вращения вокруг этой оси. Передача с двухзвенными сателлитами показана на рис. 2. Она содержит ведущее центральное колесо 1 с внутренними зубьями, неподвижное опорное центральное колесо 2 с наружными зубьями (число зубьев z_2), выполненное с двумя венцами, разнесёнными друг относительно друга в осевом направлении, ведомое центральное колесо 3 с наружными зубьями (z_3), расположенное между этими венцами, соединенное с ведомым валом. Плавающие сателлиты, состоят из вала-шестерни 4 (z_4) и двух одинаковых боковых шестерен 5 (z_5), надетых на хвостовики вала-шестерни. Боковые шестерни сателлитов способны свободно вращаться на хвостовиках. Ведущее центральное колесо 1 состоит из двух одинаковых половин, на каждой из которых выполнено по два венца с внутренними зубьями, один из них (z_1^b) предназначен для взаимодействия с боковой шестерней 5 сателлита, а другой (z_1^a) – с зубчатым венцом вала-шестерни 4 сателлита. В рассматриваемом примере (рис. 2) на внешней цилиндрической поверхности ведущего центрального колеса 1 имеются ручьи для клиновых ремней, приводящих это колесо в движение. Для выполнения условий сборки, числа зубьев колес редуктора связаны соотношением:

$$z_1^b - z_1^a = z_3 - z_2 = n, \quad (3)$$

где n – небольшое целое число: 1, 2 или 3.

Передача работает следующим образом. Ведущее центральное колесо 1 вращает плавающие боковые шестерни 5, которые обкатываются по венцам опорного центрального колеса 2. В результате оси сателлитов (мнимое водило) совершают вращательное движение вокруг главной оси

передачи. Через цилиндрические хвостовики это движение передается шестерням 4 сателлитов, которые опираются на ведущее колесо 1 и передают движение на ведомое колесо 3.

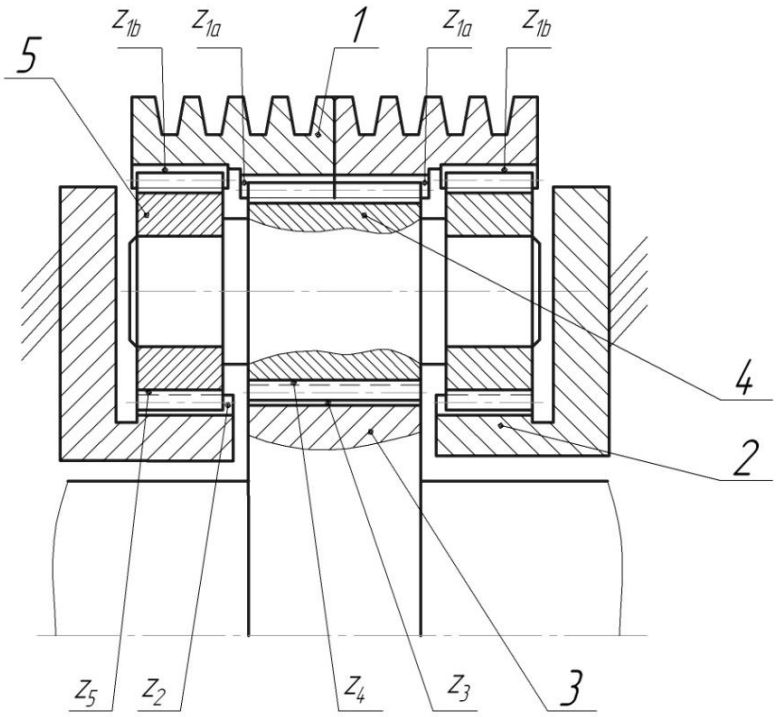


Рис. 2. Передача с двухзвенными сателлитами [RU 2463499]

Передаточное отношение i^2_{13} от центрального подвижного колеса 1 к ведомому 3 вычисляется по формуле:

$$i^2_{13} = (1 + z_2/z_1^b) / 1 - (z_2 z_1^a / z_1^b z_3). \quad (4)$$

С учетом условия (3), расчетная формула (4) приводится к виду:

$$i^2_{13} = z_3/n \quad (5)$$

На рис. 2 показана передача с числом сателлитов K = 12 и числами зубьев колёс: z_{1a}=115, z_{1b}=114, z_2=78, z_3=77, z_4= 18, z_5= 22 (т.е. n=1). При этом i^2_{13}=77.

Для разработки реальных конструкций и практического использования БПП нужно располагать методиками их прочностного расчёта и расчёта КПД. Обе методики должны опираться на задачу силового анализа механизмов, решение которой, в особенности для передач с двухзвенными сателлитами, не столь очевидно. Для корректного выполнения силового анализа, необходимо уточнить структуру механизма. Рассмотрим вначале механизм, показанный на рис. 1.

Структурный анализ механизмов

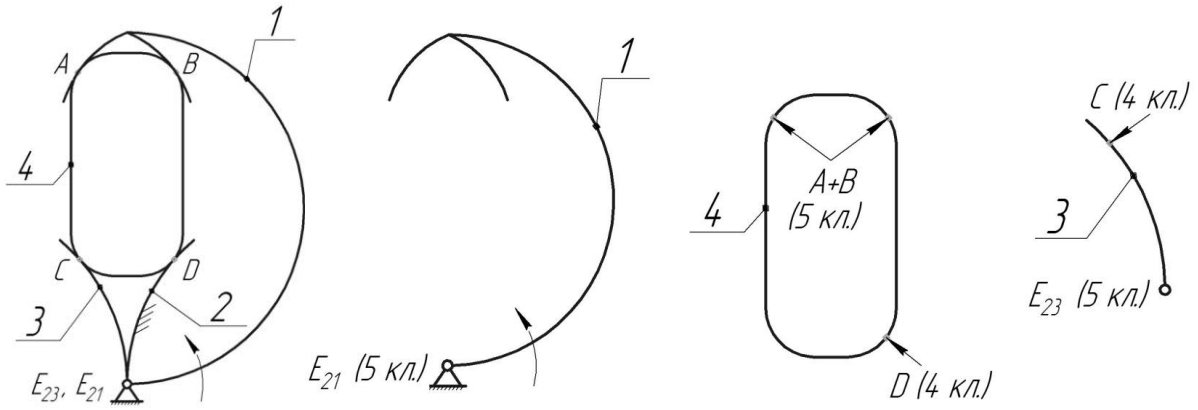
Структурная схема механизма передачи Вагнера (см. рис. 1), показана на рис. 3. Механизм содержит четыре звена, в том числе неподвижное звено 2 и две вращательных кинематических пары E_{23}, E_{21} – пары 5-го класса. C и D – это высшие кинематические пары (4-го класса). A+B это двухто-

чечная кинематическая пара 5-го класса.

Для определения числа степеней свободы W (подвижности) механизма воспользуемся структурной формулой Чебышева для плоских механизмов [2]:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4, \qquad (6)$$

где n – число подвижных звеньев (в нашем случае n=3); p_5, p_4 – числа кинематических пар 5 и 4 классов (на рис. 3 а: p_5=3, p_4=2). Получаем: $W = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 3 - 2 = 1$.



а б в г

Рис. 3. Структурная схема и элементы передачи Вагнера:
а – схема механизма; б – ведущее колесо 1 со стойкой;
в – сателлит 4 (группа Ассура); г – ведомое звено 3 (группа Ассура)

Следуя принципу Ассура [2], выделим в передаче Вагнера механизм 1-го класса – рис. 3, б (W=3·1–2·1=1) и две структурные группы: рис. 3, в (W = 3·1–2·1–1 = 0) и рис. 3, г (W = 3·1–2·1–1 = 0).

Структурная схема передачи (рис. 2) с двухзвенными сателлитами [RU 2463499] показана на рис. 4. Механизм содержит пять звеньев, в том числе неподвижное звено 2 и три вращательных кинематических пары E_{23}, E_{21}, F – пары 5-го класса. Среди кинематических пар A, B, C, D – три высших пары 4-го класса и одна двухточечная кинематическая пара 5-го класса. В этой двухточечной паре имеет место беззазорное зацепление – зуб одного колеса опирается на два зуба сопряженного колеса.

То, какое зацепление является беззазорным, зависит от углов зацепления конкретной рассматриваемой передачи. На схеме (см. рис. 4) двухточечная пара 5-го класса – D.

По формуле (6) Чебышева получаем: $W = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 4 - 3 = 1$.

Силовой анализ механизмов

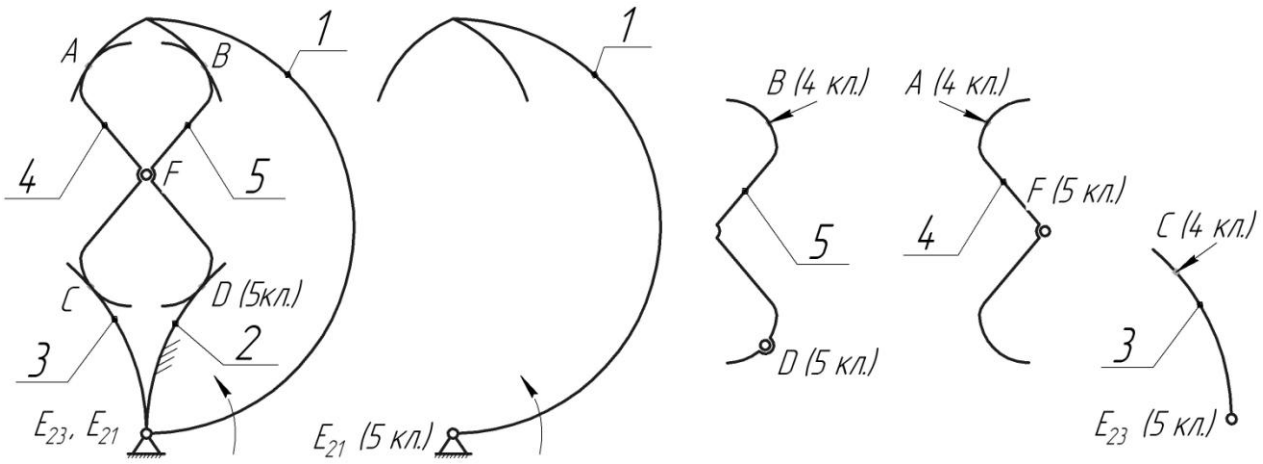
Классический метод силового анализа [2] механизмов предусматривает последовательный расчёт реакций по группам Ассура.

В передаче Вагнера (рис. 1, 3) вначале рассматриваем равновесие ведомого звена 3. В высшей кинематической паре 4 класса (С) приложена сила R_{43} (точка её приложения находится в полюсе зацепления). Эта сила направлена по общей нормали зубьев колёс 3 и 4. Угол зацепления α_{w3} определяется в результате геометрического расчёта [3] соответствующего зацепления, который может быть выполнен при помощи компьютерных программ, например, библиотеки КОМПАС-SHAFT 2D. Величину силы R_{43} определим по формуле:

$$R_{43} = F_{t3} / \cos \alpha_{w3}, \qquad (7)$$

где F_{t3} – окружная сила на колесе 3, которая может быть найдена через T_3 – момент на ведомом колесе 3, и d_{w3} – диаметр начальной окружности колеса 3:

$$F_{t3} = 2 \cdot T_3 / d_{w3}.$$



а б в г д

Рис. 4. Структурная схема и элементы передачи [RU 2463499]:
а – схема механизма; б – ведущее колесо 1 со стойкой (механизм 1 класса);
в – шестерня 5 (группа Ассура); г – вал-шестерня 4 (группа Ассура);
д – ведомое звено 3 (группа Ассура)

Для решения задач определения КПД и приближённой оценки нагрузочной способности механизмов целесообразно перейти к относительным значениям величин сил нормальных реакций R^*_i в зацеплениях. За единицу можно принять, например, величину тангенциальной силы $F_{t1}=2 \cdot T_1 / d_{w1}$, где F_{t1} – окружная сила на ведущем колесе 1; T_1 – момент на колесе 1; d_{w1} – диаметр начальной окружности колеса 1.

Относительная величина силы R_{43} выразится так:

$$R^*_{43} = F_{t1} \cdot i^2_{13} / \cos \alpha_{w3}.$$

В конкретной передаче, изображенной на рис. 1 в качестве примера, при i^2_{13}=132,05: α_{w3}=23,826°, R^*_{43}=144,3·F_{t1}.

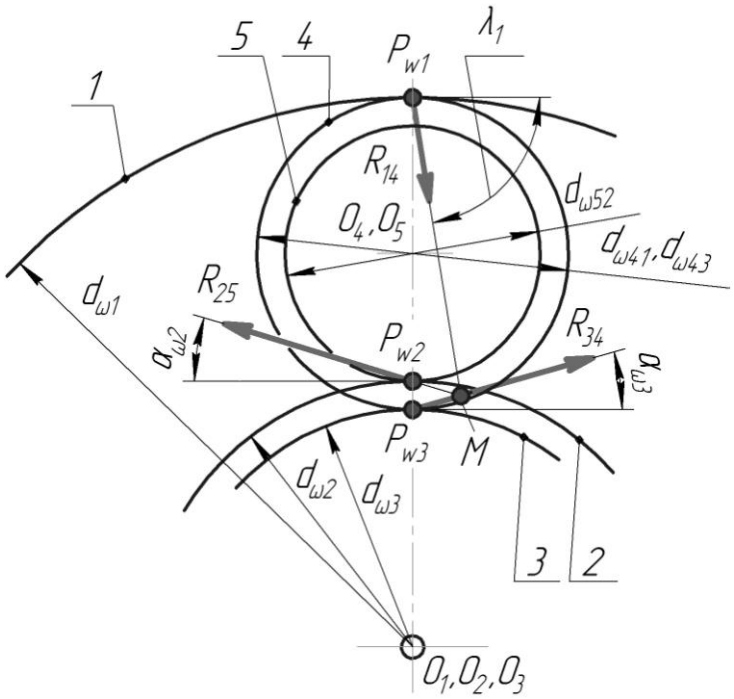


Рис. 5. Схема действующих сил в передаче Вагнера

Сателлит 4 находится в равновесии под действием трёх нормальных реакций: R_{34}, R_{25} и R_{14}. Сила R_{34}= – R_{43}, сила R_{25} известна по направлению – угол зацепления α_{w2} определяется в результате геометрического расчёта. Точка приложения силы R_{14} расположена в полюсе зацепления P_{w1} ведущего колеса 1 и сателлита 4. Направление силы R_{14} (угол давления λ_1) найдём, используя теорему о трёх сходящихся силах [4]: «Если твёрдое тело находится в равновесии под действием трёх непараллельных сил и линии действия двух из них пересекаются, то все три силы лежат в одной плоскости, а линии их действия пересекаются в одной точке». Таким образом, линия действия силы R_{14} проходит через точку M пересечения линий действия двух сил R_{25} и R_{34}.

Рассматривая треугольник сил R_{34}, R_{25} и R_{14}, получаем:

$$R_{25} = R_{34}\frac{\sin(180 - \lambda_1 - \alpha_{w3})}{\sin(\lambda_1 - \alpha_{w2})}; \qquad R_{14} = R_{34}\frac{\sin(\alpha_{w2} + \alpha_{w3})}{\sin(\lambda_1 - \alpha_{w2})}.$$

В относительных единицах для передачи, изображенной на рис. 1: R^*_{25}= 143,6·F_{t1}; R^*_{14}=113,2·F_{t1}; λ_1=89,674°.

Кинематическая пара 1-4 центроидная, а зацепление беззазорное. В беззазорном зацеплении нормальные реакции на боковых сторонах зубьев не равны результирующей реакции в кинематической паре (рис. 6).

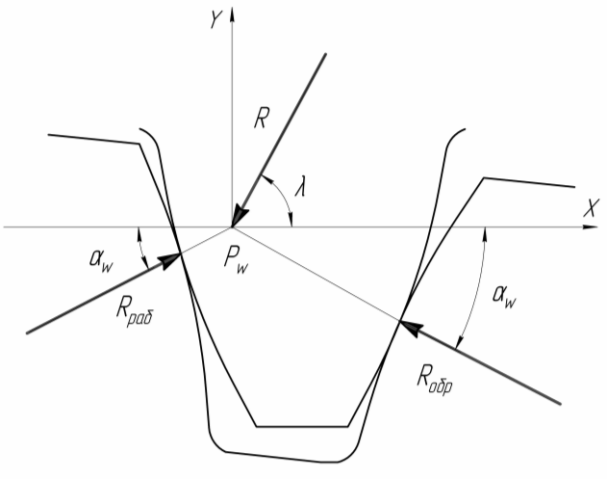


Рис. 6. Разложение сил в беззазорном зацеплении

Уравнения равновесия сил, сходящихся в полюсе зацепления P_w, в проекциях на координатные оси будут иметь вид:

$$R_{рабi} \cdot \cos\alpha_{wi} - R_{обрi} \cdot \cos\alpha_{wi} - R_i \cdot \cos\lambda_i = 0; \quad (8)$$

$$R_{рабi} \cdot \sin\alpha_{wi} + R_{обрi} \cdot \sin\alpha_{wi} - R_i \cdot \sin\lambda_i = 0. \quad (9)$$

Решая систему уравнений (8) и (9) получаем:

$$R_{рабi} = R_i \frac{\sin(\lambda_i + \alpha_{wi})}{\sin 2\alpha_{wi}}; \quad (10)$$

$$R_{обрi} = R_i \frac{\sin(\lambda_i - \alpha_{wi})}{\sin 2\alpha_{wi}}. \quad (11)$$

В формулах (8)…(11) индекс i относится к конкретному зацеплению.

В рассматриваемом примере по формулам (10) и (11) получаем: $R^*_{раб1} = 141{,}6 \cdot F_{t1}$; $R^*_{обр1} = 140{,}6 \cdot F_{t1}$.

В нашей передаче (рис. 2, 4, 7) вначале также рассматриваем равновесие ведомого звена 3. В высшей кинематической паре 4 класса (C) приложена сила R_{43}. Угол зацепления α_{w3} определяется в результате геометрического расчёта. Величина силы: $R_{43} = F_{t3} / \cos\alpha_{w3}$, где F_{t3} – окружная сила на колесе 3.

Вал-шестерня 4 сателлита (см. рис. 4,г; 8,а) находится в равновесии под действием трёх реакций: R_{34}, R_{54} и R_{14}. Сила $R_{34} = -R_{43}$, сила R_{14} известна по направлению – угол зацепления α_{w1a} определяется в результате геометрического расчёта. Точка приложения силы R_{54} (угол λ_{54}) расположена во вращательной кинематической паре F (точке O_4). Направление силы R_{54} найдём, используя теорему о трёх сходящихся силах, из которой следует, что линии действия сил R_{34}, R_{45} и R_{14} пересекаются в точке M_1. Рассматривая треугольник сил R_{34}, R_{54} и R_{14}, находим угол λ_{54} и силы:

$$R_{54} = R_{34} \frac{\sin(180 - \alpha_{w1a} - \alpha_{w3})}{\sin(\alpha_{w1a} - \lambda_{54})}; \qquad R_{14} = R_{34} \frac{\sin(\alpha_{w3} + \lambda_{54})}{\sin(\alpha_{w1a} - \lambda_{54})}.$$

В конкретной передаче, изображенной на рис. 2, в качестве примера (при n=1), принимая F_{t1}=1, получим: R^*_{34}=86,2·F_{t1}; R^*_{14}= 89,9·F_{t1}; R^*_{54}=155,7·F_{t1}; λ_{54}=1,79°.

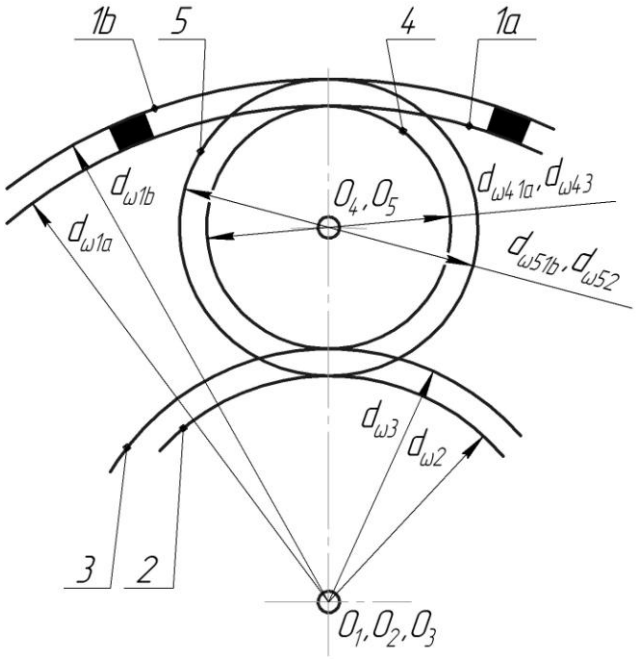
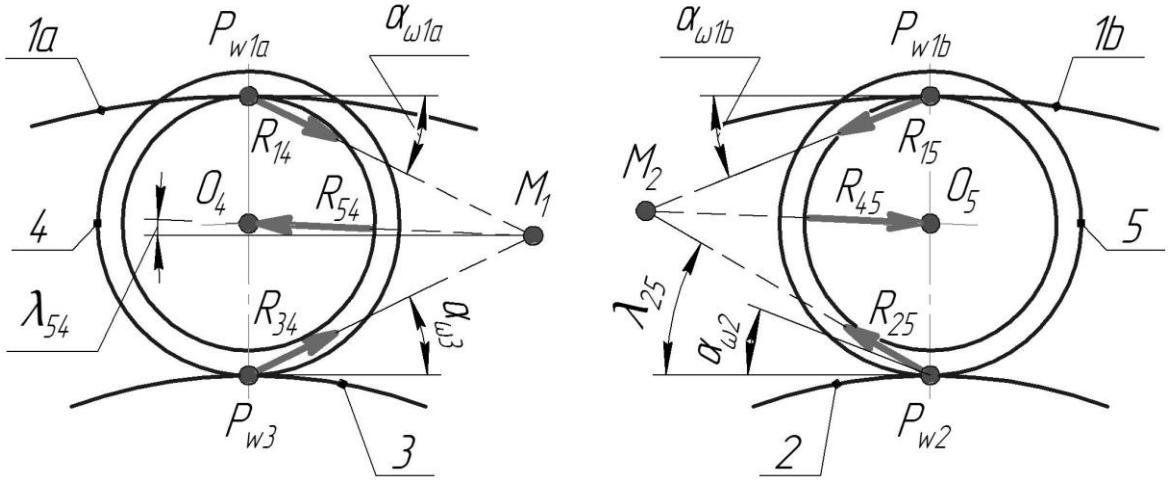


Рис. 7. Кинематическая схема передачи [RU 2463499]



а б

Рис. 8. Схема действующих сил в передаче [RU 2463499]:
а – на вал-шестерню 4; б – на боковую шестерню 5

Боковая шестерня 5 сателлита (рис. 8, б) находится в равновесии под действием трёх реакций: R_{45}, R_{25} и R_{15}. Сила R_{45}= – R_{54}, сила R_{15} известна по направлению – угол зацепления α_{w1b} определяется в результате геометрического расчёта. Мы предположили, что кинематическая пара D 5-го класса (зацепление колеса 2 с шестерней 5 – беззазорное), поэтому, кроме величины силы R_{25} необходимо определить и её направление (угол давле-

ния λ_{25} в кинематической паре D). Линии действия сил R_{45}, R_{25} и R_{15} пересекаются в точке M_2. Рассматривая треугольник сил R_{45}, R_{25} и R_{15}, находим угол λ_{25} и силы:

$$R_{25} = R_{45}\frac{\sin(\alpha_{w1b} + \lambda_{54})}{\sin(180 - \alpha_{w1b} - \lambda_{25})}; \quad R_{15} = R_{45}\frac{\sin(\lambda_{25} - \lambda_{54})}{\sin(180 - \alpha_{w1b} - \lambda_{25})}.$$

В примере (см. рис. 2, n=1, F_{t1}=1), получаем: $R^*_{25} = 94{,}3 \cdot F_{t1}$; $R^*_{15} = 86{,}2 \cdot F_{t1}$; $\lambda_{25} = 30{,}75°$.

Замечаем, что найденный в результате геометрического расчёта угол $\alpha_{w2} = 20°$, меньше угла давления λ_{25}=30,75°. Это значит, что реакция R_{25} разлагается на составляющие нормальные реакции $R_{раб2}$ и $R_{обр2}$ (см. рис. 6). В рассматриваемом примере получаем $R^*_{раб2} = 113{,}6 \cdot F_{t1}$; $R^*_{обр2} = 27{,}3 \cdot F_{t1}$.

Если бы угол λ_{25} оказался меньше угла α_{w2}, это означало бы, что кинематической парой 5-го класса при данных параметрах механизма, является не пара D, а другая пара, образуемая сателлитом с центральными звеньями, A, B или C. В таком случае, механизм нужно структурировать несколько иначе.

Рассмотренный подход к решению задач силового анализа может быть применен и к другим видам безводильных планетарных передач. Зная силы, действующие в кинематических парах, можно решать задачи расчёта КПД и нагрузочной способности механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев, В.Н. Планетарные передачи: изд. 2-е / В. Н. Кудрявцев. – Л. : Машиностроение, 1966. – 308 с.
2. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – М. : Наука, 1967. – 719 с.
3. Болотовский, И.А. Справочник по геометрическому расчёту эвольвентных зубчатых и червячных передач: изд. 2-е перераб. и доп. / И.А. Болотовский [и др.] – М. : Машиностроение, 1986. – 448 с.
4. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. – М. : Высш. школа, 2006. – 416 с.

УДК 620.19

Е.Ю.Нефедьев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧИ В ТРУБОПРОВОДАХ ИТЕР



Нефедьев Евгений Юрьевич, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией промышленных исследований и неразрушающего контроля ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И.Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ») Россия, Санкт-Петербург
телефон: +7-812-578-88-04, факс: +7-812-271-12-04;
e-mail: ne246@ya.ru

Аннотация

Исследование посвящено изучению возможности определения параметров утечек в трубопроводах ИТЭР посредством метода акустической эмиссии. Представлены результаты исследования утечек в трубопроводах, длиной от 900 мм до 150 м. Поток был осуществлен с помощью пара и воды через трещины усталости в размере от 5 до 39 мм в трубопроводах. Мы исследовали закономерности изменения амплитудных, временных и спектральных параметров сигналов акустической эмиссии. Потери через поток, и расстояние от источника утечек в датчиков АЭ были изменены. Была разработана методика, которая позволяет определить координаты и параметры утечки через информацию о сигналов АЭ

Ключевые слова: акустическая эмиссия, утечки, трубопровод, трещины, расход, спектральные параметры, координаты утечки.

Ph.D. Evgeny Nefedyev

THE USE OF ACOUSTIC EMISSION METHOD WITH SPECTRAL ANALYSIS OF SIGNALS TO DETERMINE THE PARAMETERS OF LEAKS IN PIPELINES ITER

Central Boiler and Turbine Institute (CKTI), Russia, e-mail: ne246@ya.ru

Abstract

Research is devoted to the study of the possibility of determining the parameters of leaks in the pipelines of ITER by the acoustic emission method. Research results are presented for leaks in pipelines, length from 900 mm to 150 m. Flow was carried out with steam and water through fatigue cracks in size from 5 to 39 mm in the pipelines. We investigated regularities of changes of the

amplitude, temporal and spectral parameters of acoustic emission signals. The loss through flow and the distance from the source of leaks to the AE sensors were changed. Methodology was developed, which allows to determine the coordinates and parameters of leakage through information on the AE signals.

Keywords: Acoustic emission, leaking, a pipeline, a crack, flow rate, spectral parameters, coordinates of leak.

1. Введение

Изучении возможности дистанционного определения местоположения течи в трубопроводах системы охлаждения ИТЭР было выполнено в ОАО «НПО ЦКТИ». Целью исследования была выработка рекомендаций.

При изучении течей по программе ИТЕР методом акустической эмиссии (АЭ) были проделаны разнообразные эксперименты. Объекты в виде участка трубы длиной от 900милиметров до 150метров были изучены. Были проведены многочисленные эксперименты, в том числе:

- Исследование амплитуд сигналов АЭ при различных расходах жидкости на трубе длиной 150 метров.
- Исследование спектрального состава сигналов АЭ при различной длине усталостной трещины.
- Исследование изменения спектрального состав сигналов АЭ от течи на различном расстоянии от источника.
- Получение регрессионных зависимостей между параметрами расхода жидкости через течь, расстояния до течи и амплитудными и частотными характеристиками сигналов АЭ.

Далее представлены результаты данных экспериментов

2. Раздел 1

Для проведения исследований АЭ контроля при вытекании воды через трещину в трубопроводе была изготовлена установка, схема которой приведена на рисунке 1.

В центральной части трубы (1) был вварен участок трубопровода (2) □101.6x5.7 мм контура охлаждения из стали 08Х18Н10Т со сквозной трещиной. После заполнения трубы водой в ней создавалось избыточное давление при помощи баллона с азотом 3. Величина давления поддерживалась на заданном уровне при помощи регулятора давления 4. Поступающая из трещины вода собиралась в емкость с целью измерения расхода.

Для регистрации АЭ использовалась система СДАЭ-8 с датчиками АП-206. Использованный частотный диапазон находился в пределах: 20 кГц-150 кГц.

Измерения амплитуды АЭ сигналов проводилось при разных давлениях в трубе и различных расходах воды через трещину показаны на рисунке 2.

Выводы по разделу 1.

1.1. При минимальном расходе воды в данном эксперименте 0.23 литра в минуту течь надежно фиксировалась методом АЭ при установке датчиков на расстояниях от 0 до 20 метров.

1.2. Течи с расходом менее 0.23 литра в минуту можно зафиксировать, расположив датчик АЭ на минимальном расстоянии от трещины. Минимальный расход, который можно зафиксировать в таких условиях, зависит от уровня шума, создаваемого работающим оборудованием.

1.3 При больших утечках (0.35-2 л/мин), дальность обнаружения может быть более чем 80 м, используя тот же уровень чувствительности, как и в 1.1

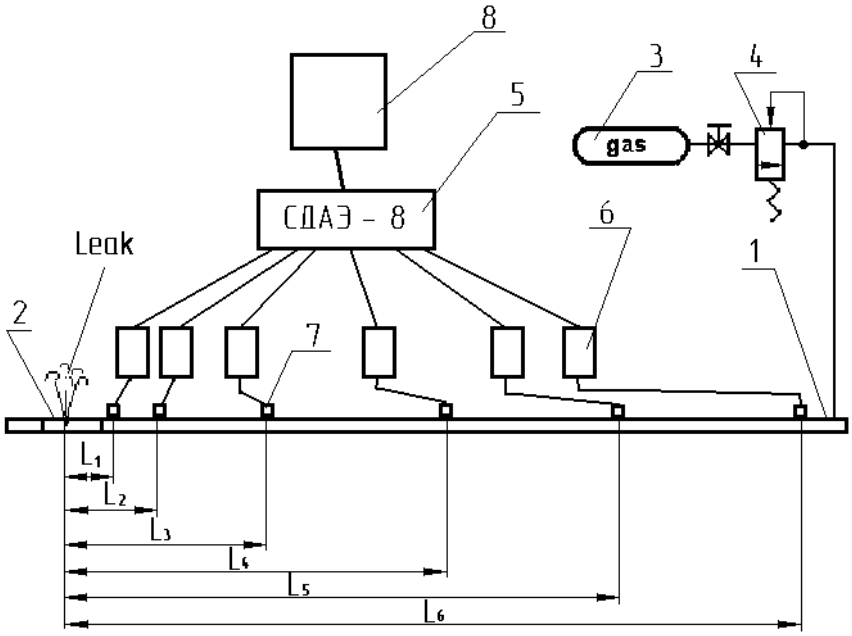


Рис.1.

1- труба □110х10 мм, длиной 150м; 2 - участок трубопровода □101.6х5.7 мм; 3- баллон с азотом; 4 – регулятор давления; 5 – АЭ - система; 6 – предварительный усилитель; 7 – АЭ – датчик; 8 – ЭВМ.

3. Раздел 2

Исследование спектрального состава сигналов АЭ при различной длине усталостной трещины

Данные исследования производилось на модели трубопровода Ø76.3х5.2 мм, длиной 900 мм.

Под действием внутреннего давления происходило истечение теплоносителя через сквозную трещину. Одновременно на трубе, на расстояниях 40 мм и 430 мм от трещины на волноводах были установлены датчики акустической эмиссии с целью фиксации акустических сигналов, излучаемых течью. Регистрировались непрерывные сигналы от течи или пара.

Спектральный состав сигналов АЭ показана на рис. 3–5.

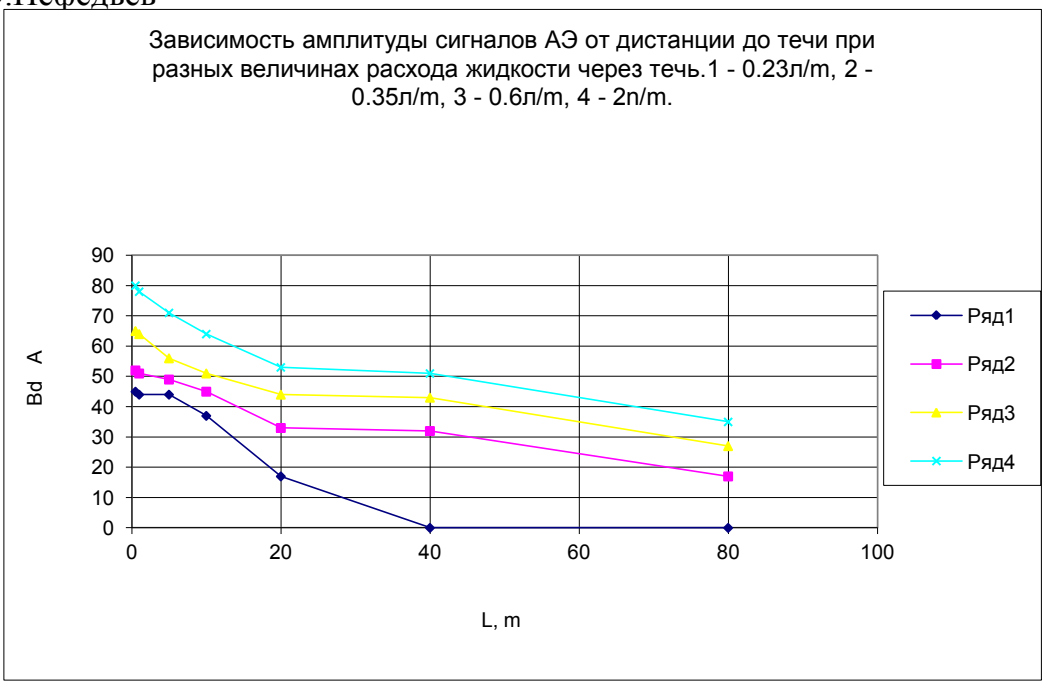


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигналов АЭ от расстояния до течи при различных величины расхода.

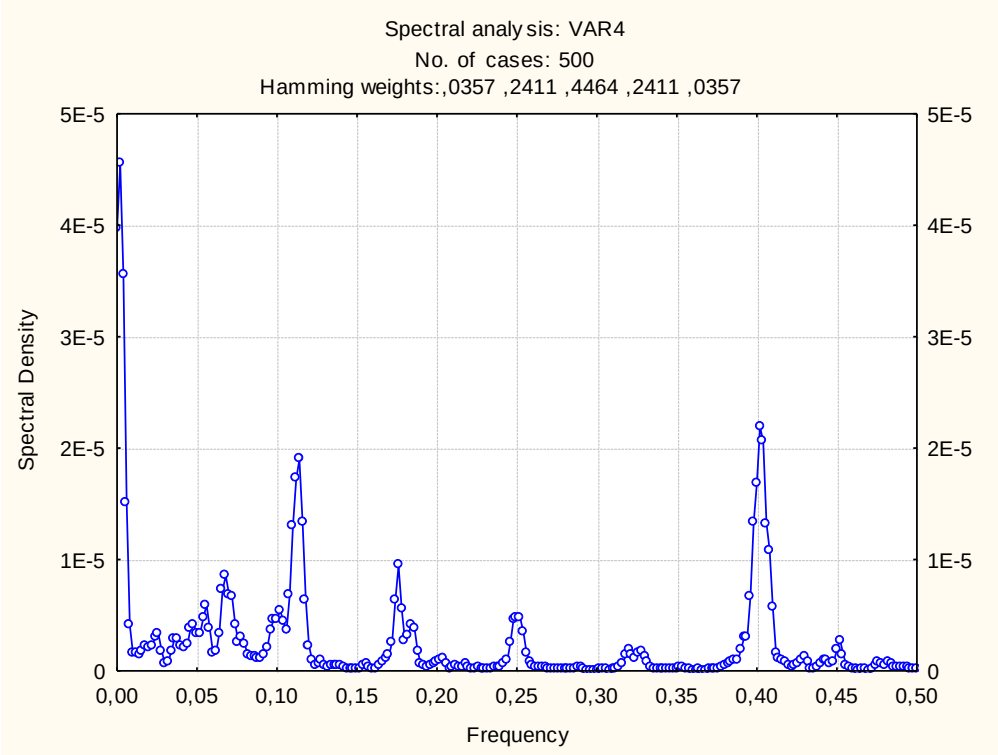


Рис. 3. Спектральный состав сигналов АЭ от жидкости, истекающей через трещину длиной 5 мм (масштаб по оси X 5МГц; масштаб по оси Y В/МГц)

Выводы по разделу 2

Были получены три основные закономерности:

2.1. Амплитуда сигналов АЭ растет с ростом размеров трещины и расхода среды через течь;

2.2. Частота сигналов АЭ снижается с увеличением длины трещины и расхода среды.

2.3. Сигналы очень неоднородны по спектральному составу из-за малых размеров модели и не стационарности процесса.

2.4.Вид спектра сигналов значительно отличался в разных местах расположения ПАЭ, что, по-видимому, связано с резонансными явлениями в ограниченной по размерам модели. Предположительно различие в сигналах может быть и из-за изменения количества воды в небольшой трубе в процессе истечения жидкости.

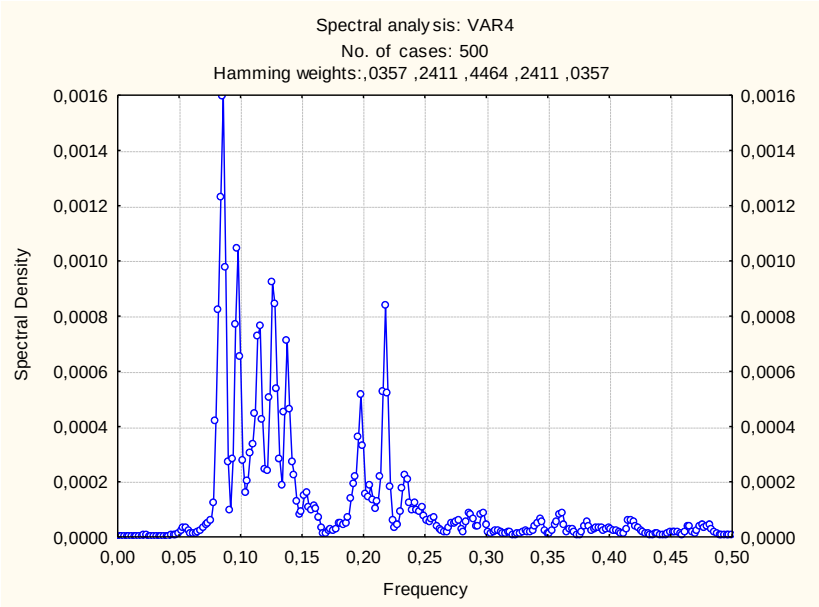


Рис. 4. Спектральный состав сигналов АЭ от жидкости, истекающей через трещину длиной 12 мм (масштаб по оси X 1МГц; масштаб по оси Y В/МГц)

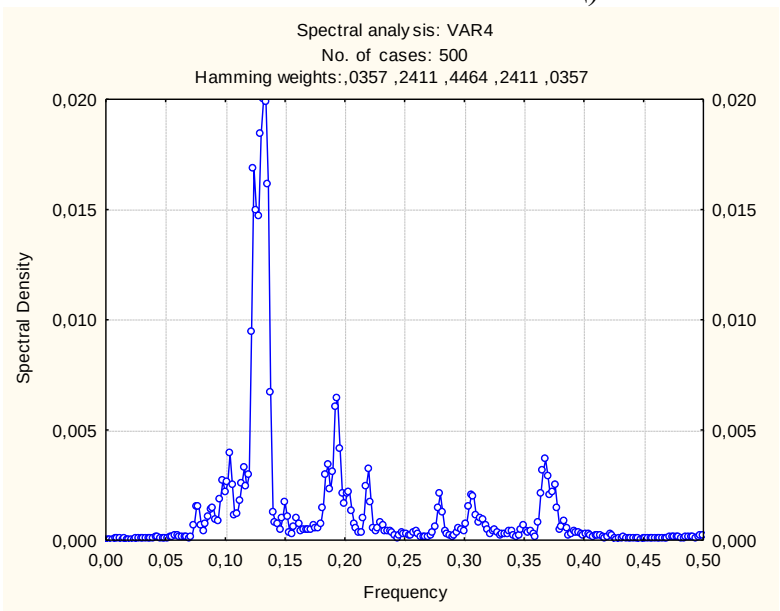


Рис. 5. Спектральный состав сигналов АЭ от жидкости, истекающей через трещину длиной 39 мм (масштаб по оси X 1МГц; масштаб по оси Y В/МГц)

4. Раздел 3

Исследование изменения спектрального состав сигналов АЭ от течи на различном расстоянии от источника

Одним из направлений дальнейших исследований было предложено изменить размеры модели, путем увеличения ее длины и приближения к размерам реальных трубопроводов, что должно позволить исключить выше описанные недостатки.

Данный этап исследований проведен на модели трубопровода Ø106х9 мм, имеющего длину 150 метров. В средней части данного трубопровода был вварен участок трубы с дефектом в виде трещины.. Труба была полностью заполнена водой. Испытания проводились при комнатной температуре. Под действием постоянного внутреннего давления, происходило истечение теплоносителя через сквозную трещину. Одновременно на трубе, на расстояниях 500 мм, 1 метр, 5 метров и 10 метров были установлены широкополосные преобразователи (с шириной полосы пропускания 10 кГц – 1МГц) акустической эмиссии с целью фиксации акустических сигналов, излучаемых течью. Регистрировались непрерывные сигналы от течи с помощью широкополосного цифрового осциллографа. Далее сигналы переписывались в ЭВМ, где и вычислялся их спектральный состав.

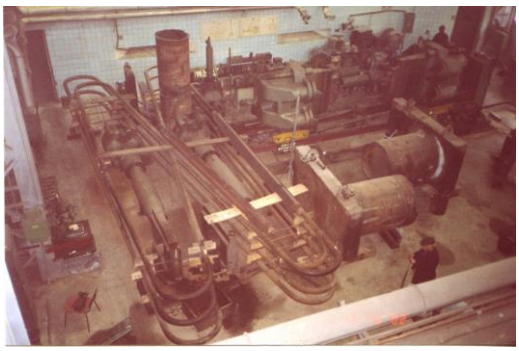


Рис. 6. Общий вид 150 метрового трубопровода в левой части стенда ЦКТИ

Спектральный состав сигналов АЭ на разных расстояниях от течи показан на рисунках 7-10.

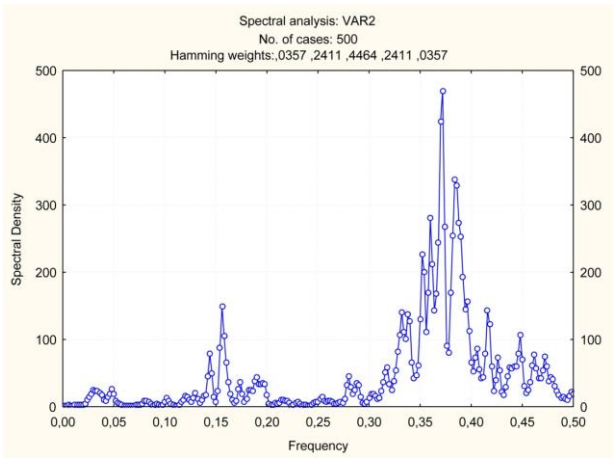


Рис. 7. Спектр сигналов на расстоянии 0,5 метра от течи

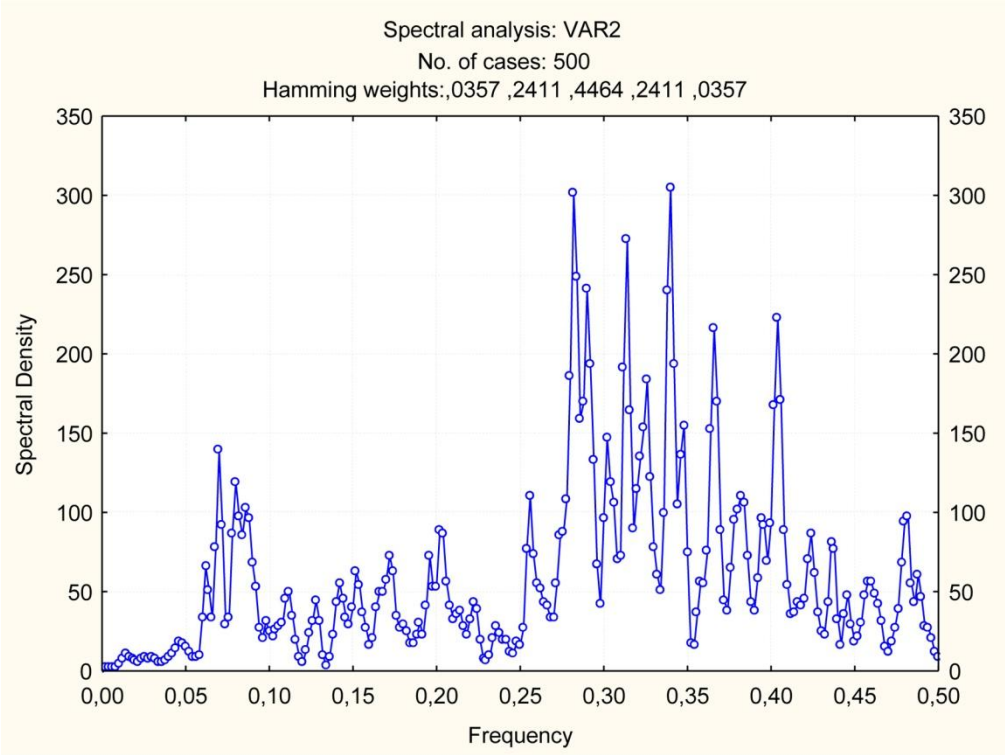


Рис. 8. Спектр сигналов на расстоянии 1,0 метра от течи

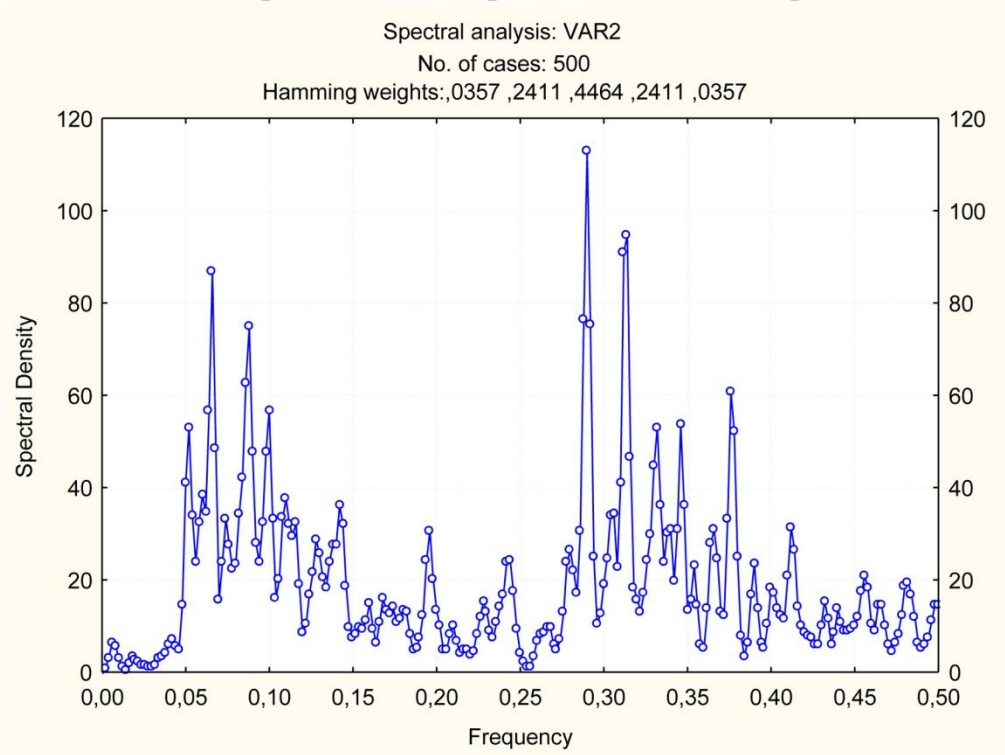


Рис. 9. Спектр сигналов на расстоянии 5,0 метров от течи

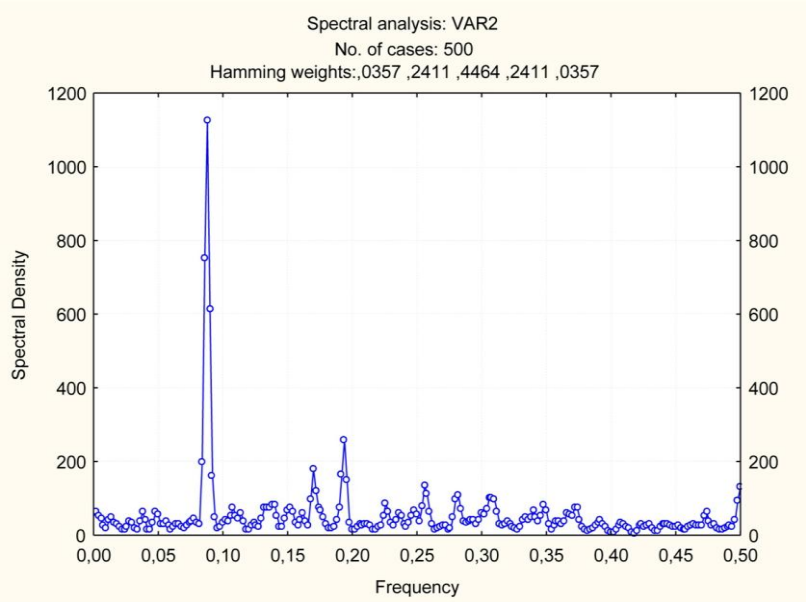


Рис. 10 Спектр сигналов на расстоянии 10,0 метров от течи

Из анализа спектрального состава сигнала видно, что на расстоянии 0,5 метра доминирует спектральная составляющая с медианной частотой 0,37 МГц. Кроме того присутствует более низкочастотная мода с частотой 0,16 МГц.

На расстоянии 1 метр от течи в спектре сигналов АЭ медиана высокочастотной составляющей снижается с 0,37 МГц до 0,3 МГц. В низкочастотной части спектра появляется пик на 0,08 МГц.

На расстоянии 5 метров от течи медианные частоты пиков сохраняются на значения 0,3 МГц и 0,08 МГц. Однако в данном случае энергия этих спектральных областей практически сравниваются. То есть энергия сигналов перетекает в более низкочастотную областью

На расстоянии 10 метров от течи мы наблюдаем, что практически вся энергия сигналов АЭ находится в пике с частотой 0,08 МГц.

Выводы по разделу 3

Данные результаты показывают, что при распространении сигналов АЭ от течи спектральный состав сигналов меняется. На малых расстояниях основная энергия сосредоточена в частотном диапазоне 300 – 400 кГц. По мере продвижения по трубе вдаль от источника в спектре сигнала начинает доминировать низкочастотная составляющая с частотой 70 – 80 кГц .

5. Раздел 4

Получение регрессионных зависимостей между параметрами расхода жидкости через течь, расстояния до течи и амплитудными и частотными характеристиками сигналов АЭ

Направлением дальнейших исследований была попытка получения регрессионной зависимость между параметрами расхода, расстояния до течи, амплитудными и частотными характеристиками сигналов АЭ

Обработав методами математической статистики данные из раздела 1 о зависимости амплитуды сигналов АЭ от расстояния до течи и расходе

жидкости через нее можно получить регрессионное уравнение связывающее эти три параметра.

Выражение для амплитуды сигнала АЭ выглядит следующим образом:

$$A = f(X,R) = C0 + C1 * X + C2 * R, \quad \{1\}$$

где А – амплитуда сигналов АЭ в децибелах, Х – расстояния от ПАЭ до течи в метрах, R- расход жидкости через течь в литрах в минуту, С0, С1 и С2 –константы. В данном случае С0 = 49,5 дБ, С1 = 0,46 дБ/м, С2 = 11,6 дБ*мин/литр.

Кроме того исходя из законов акустики и результатов раздела 1 можно вывести выражения для координаты течи по соотношению амплитуд сигналов АЭ, зарегистрированных двумя ПАЭ, независимо от величины расхода через течь.

$$X = X1 + 0{,}5 * [X12 - (A1 - A2)/K], \quad \{2\}$$

где Х – координата течи, Х1 – координата первого ПАЭ, Х12 – расстояние между первым и вторым ПАЭ, (А1 – А2) –разница амплитуд сигналов АЭ, зарегистрированных первым и вторым ПАЭ, К – коэффициент затухания в децибелах на метр.

Данные кросскорреляционного анализа позволяют рассчитать координату дефекта или течи, зная запаздывание τ и скорость распространения акустических волн в трубопроводе – V.

$$X = X1 + 0{,}5 * [X12 - \tau * V], \quad \{3\}$$

Таким образом, данные, полученные в предварительных экспериментах и формулы {1-3} позволяют определить как координаты течи, так и ее расход.

6. Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что на основании данных аналоговых и цифровых измерений можно разработать методику выявления течей методом АЭ, а также определять ее координаты и расход.

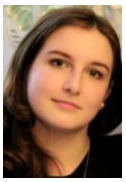
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая Эмиссия. Издательство Стандартов. – М., 1976. – 272 с.
2. Правила применения метода акустической эмиссии при проведении контроля котлов, сосудов, аппаратов и технологических трубопроводов. ПБ 03-593-03. М., 2003.
3. Д. Бендат, А. Пирсол, Применение корреляционного и спектрального анализа. – М.: МИР, 1983. – 248с.

УДК 62-333.2

Е. В. Носова, В. А. Пискунов, В. В. Носов

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЗАПОРНОГО КОЛПАКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО КЛАПАНА



Екатерина Викторовна Носова, студент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)-927-36-21, E-mail: catherine_1117@mail.ru



Владимир Александрович Пискунов, студент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия, Санкт-ПетербургТел.: (921)-585-20-57, E-mail: ildan.05@mail.ru



Виктор Владимирович Носов, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (904)-617-94-38, E-mail: nosovvv@list.ru

Аннотация

В статье рассмотрена проблема определения разрушающего давления, действующего на запорный колпак быстродействующего пневматического клапана. Произведен сравнительный анализ двух методов – расчета по формуле Лапласа и конечно-элементного расчета в программе ANSYS и сопоставление рассчитанных значений давления с полученными в результате эксперимента.

Ключевые слова: быстродействующий пневматический клапан, запорный колпак, формула Лапласа, конечно-элементный анализ, эксперимент

Nosova E.V., Piskunov V.A., Nosov V.V.

STRENGTH ANALYSIS OF LOCKING CAP OF FAST-ACTING PNEUMATIC VALVE

Dr. Viktor V. Nosov[1], e-mail: nosovvv@list.ru;
Ekaterina V. Nosova[1], e-mail: catherine_1117@mail.ru;
Vladimir A. Piskunov[1], e-mail: vildan.05@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article considers the problem of determining the destructive pressure acting on the locking cap of the fast-acting pneumatic valve. A comparative analysis of the two methods - the calculation using the Laplace formula and fi-

nite-element analysis in ANSYS and comparing the calculated pressure values with those obtained in the experiment were produced.

Key words: fast-acting pneumatic valve, locking cap, Laplace formula, finite-element analysis, experiment

Объектом исследования статьи является запорный колпак быстродействующего пневматического клапана КБ-80-50.

Данный клапан произведен ООО "НПП ИСТА" и предназначен для коммутации потока сжатого газа в пневматических устройствах.

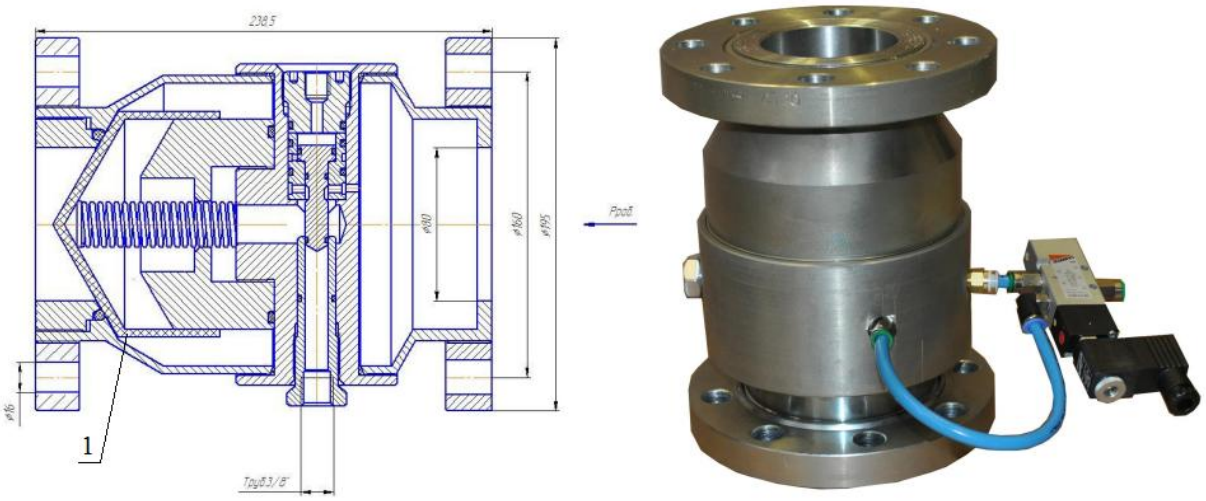


Рис. 1. Сборочный чертеж и фото внешнего вида клапана КБ 80-50

Позицией 1 на габаритном чертеже обозначен сам запорный колпак выполненный из материала хостаформ марки C9021GV1/40. Предел текучести данного материала 140 МПа, коэффициент Пуассона 0,4.

В состоянии когда клапан закрыт, колпак опирается на седло и находится в сложно деформированном состоянии. Задачей является сравнение результатов аналитических расчетов проведенных в программе ANSYS с результатами эксперимента по нахождению максимального давления, которое может выдержать запорный узел.

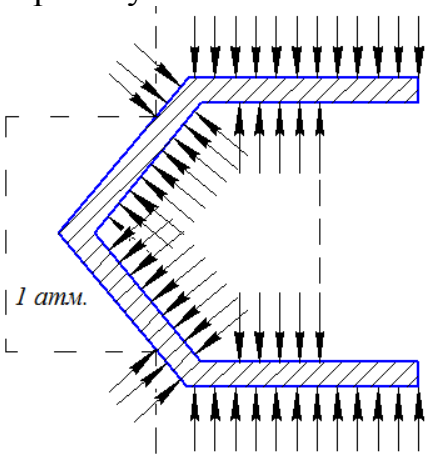
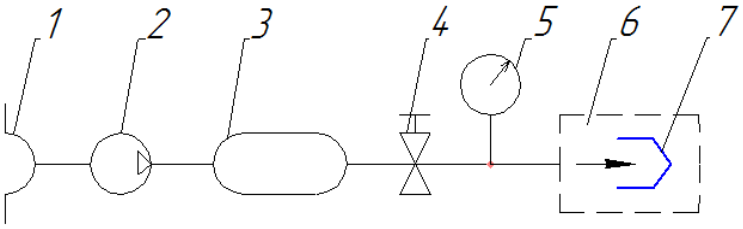


Рис. 2. Нагрузки, прикладываемые к запорному колпаку клапана КБ 80-50

На рис. 2 показаны нагрузки, действующие на колпак. Стрелками показано избыточное давление. На цилиндрическую и коническую части давление направлено нормально.



1- воздухозаборник; 2- компрессор высокого давления; 3- ресивер; 4- ручной вентиль; 5- манометр; 6- условное обозначение клапана; 7- условное обозначение колпака.

Рис. 3. Пневматическая схема эксперимента по определению предельного давления.

Компрессор высокого давления накачивает сжатый воздух в ресивер. Из ресивера при помощи ручного вентиля сжатый воздух подается в клапан. Значение давления фиксируется на манометре.

Разрушение колпака произошло при значении давления в 61 атм. Внешний вид разрушенного колпака представлен на рис. 4.



Рис. 4. Разрушенный колпак.

Рассмотрим решение с помощью формулы Лапласа. Для этого выведем формулу Лапласа для произвольной геометрии (рис. 5), затем применим ее к конической оболочке вращения.

Так как рассматривается безмоментная теория, то примем K=N=M=0, где K-кольцевой момент на единицу длины меридиана срединной поверхности; M-меридиональный момент на единицу длины кольцевого сечения срединной поверхности; N - перерезывающая сила на единицу длины

кольцевого сечения срединной поверхности. Действующие силы не равные нулю: U - меридиональная сила на единицу длины кольцевого сечения срединной поверхности; T - кольцевая сила на единицу длины меридиана срединной поверхности.

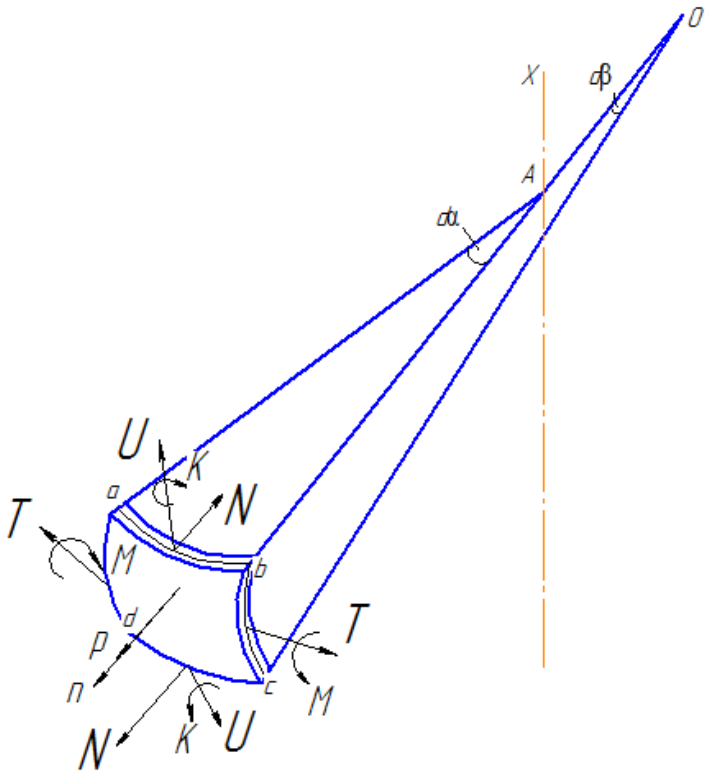


Рис. 5. Элементарная поверхность.

Запишем уравнение равновесия элемента в проекциях на нормаль n к срединной поверхности.

На грань ab длиной dy действует нормальное меридиональное напряжение σ_m:

$$\sigma_m = \frac{U}{S};$$

где S - толщина элемента.

Тогда меридиональная сила упругости, действующая на грань ab,

$$Udy = \sigma_m S dy.$$

Она действует под углом $\frac{\pi}{2} + \frac{d\beta}{2}$ к нормали, поэтому ее проекция на нормаль будет

$$\sigma_m S dy cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{d\beta}{2}\right) = -\frac{1}{2}\sigma_m S dy d\beta.$$

Сила, действующая на грань cd, дает, без учета бесконечно малой третьего порядка, такую же проекцию на нормаль n.

На гранях ac и bd длиной dy действует нормальное кольцевое напряжение $\sigma_t = \frac{T}{S}$.

Тогда кольцевая сила упругости, действующая на гранях ac и bd

$$Tdx = \sigma_t S dx.$$

Эта сила составляет с нормалью угол $\frac{\pi}{2} + \frac{d\alpha}{2}$. Ее проекция на нормаль

$$\sigma_t S dx cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{d\alpha}{2}\right) = -\frac{1}{2}\sigma_t S dx d\alpha.$$

Сила от действия внутреннего давления P: $P = pdxd\alpha$.

Алгебраическая сумма проекций всех сил должна быть равна нулю. Тогда $\sigma_m S dy d\beta + \sigma_t S dx d\alpha - pdxd\alpha = 0$.

Так как $dx = d\beta R_1$ и $dy = d\alpha R_2$ ($R_1 = bO, R_2 = bA$, радиусы кривизны меридионального и кольцевого сечений срединной поверхности), получим окончательное уравнение Лапласа:

$$\frac{\sigma_m}{R_1} + \frac{\sigma_t}{R_2} = \frac{p}{S}.$$

Воспользуемся последней формулой для описания конической оболочки.

Для возможного применения уравнения равновесия зоны оболочки выразим текущий радиус и угол β через известные величины:

$$r = xsin\alpha;\ \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha; \sin\beta = \sin\alpha.$$

Получим $2Ucos\alpha - pxsin\alpha = 0;\quad U = \frac{pxtg\alpha}{2};\quad \sigma_m = \frac{pxtg\alpha}{2S}$.

По уравнению Лапласа:

$$\frac{U}{R_1} + \frac{T}{R_2} = p;\quad R_1 = \infty;\quad R_2 = R_2(x) = xtg; T = pxtg;\ \sigma_t = \frac{pxtg\alpha}{S}.$$

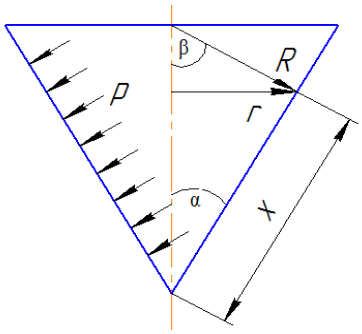


Рис. 6. Коническая оболочка

Для рассчитываемого колпака имеем: $x = 45$ мм, $\alpha = 65°$.

Соответственно нормальное кольцевое напряжение, разрушающее колпак будет равно: $\sigma_t = \frac{pxtg\alpha}{S} = \frac{5{,}85*45*tg65°}{4} = 141{,}1$ МПа.

Следовательно, разрушение должно произойти при 58,5 атм.

Конечно-элементный расчет в среде ANSYS рассмотрим в несколько этапов.

1. Расчетная схема

Рассматривается двумерная модель колпака – оболочки вращения.

С целью упрощения конечно-элементного разбиения резиновое кольцо круглого сечения заменено на кольцо квадратного сечения, равного по площади.

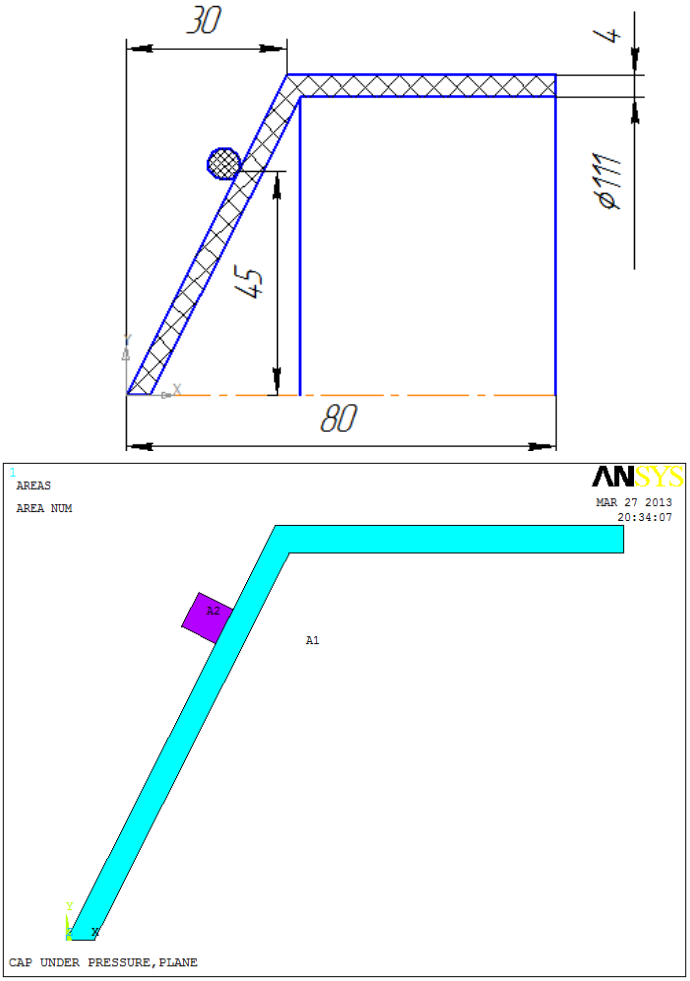


Рис. 7. Геометрия расчетной модели

2. Конечно-элементная модель

Тип конечных элементов – Plane42, осесимметричная постановка задачи. Количество элементов – 13658, число степеней свободы – 27316. Сетка равномерная, величина элемента – 0,17мм.

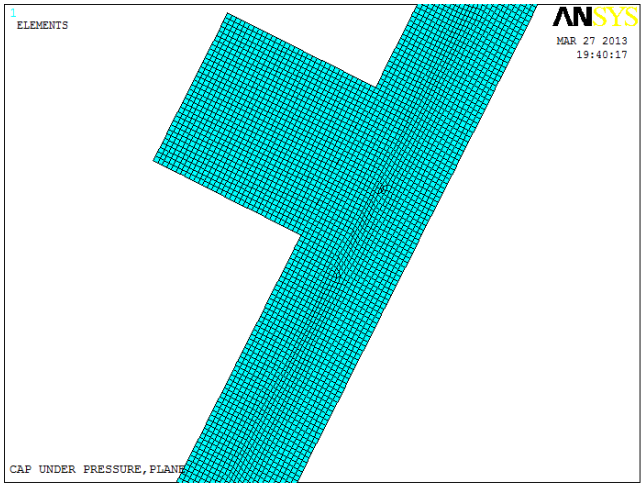


Рис. 8. Конечно-элементная сетка

3. Граничные условия

Рассматривается момент прилегания наружной поверхности оболочки к стальным элементам, который описывается ограничением всех степеней свободы по линиям прилегания. Контакт оболочки и резинового уплотнения моделируется с помощью связывания перемещений узлов на краях уплотнения и оболочки.

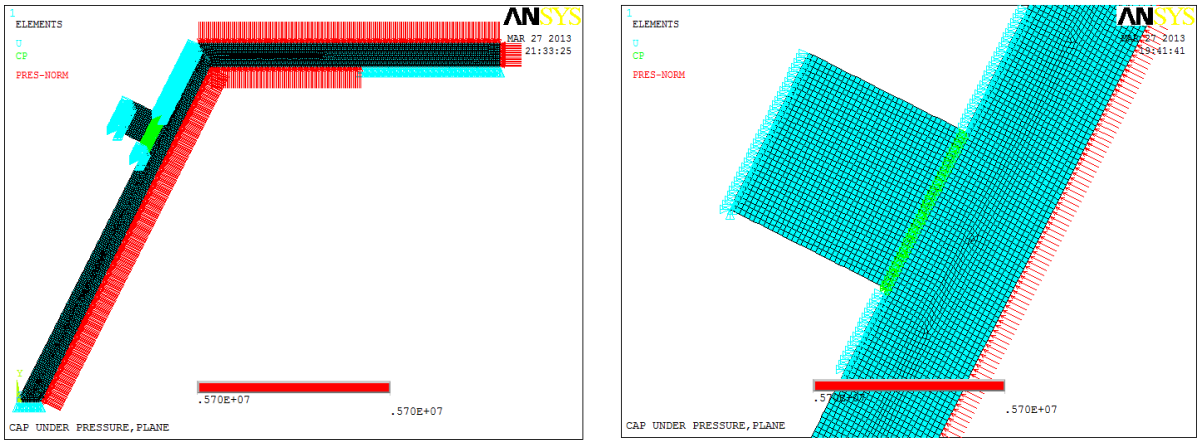


Рис. 9. Граничные условия

4. Результаты расчета

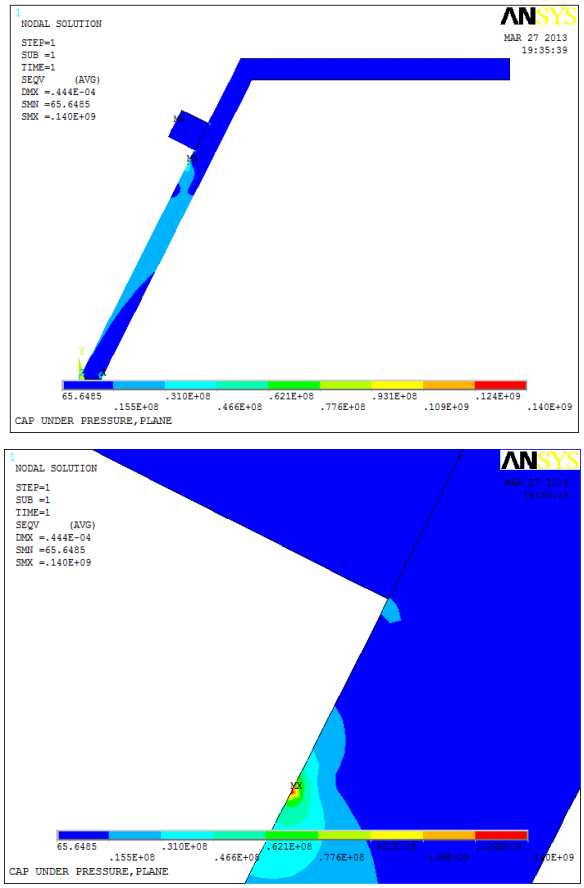


Рис. 10. Распределение эквивалентных напряжений (по критерию Мизеса)

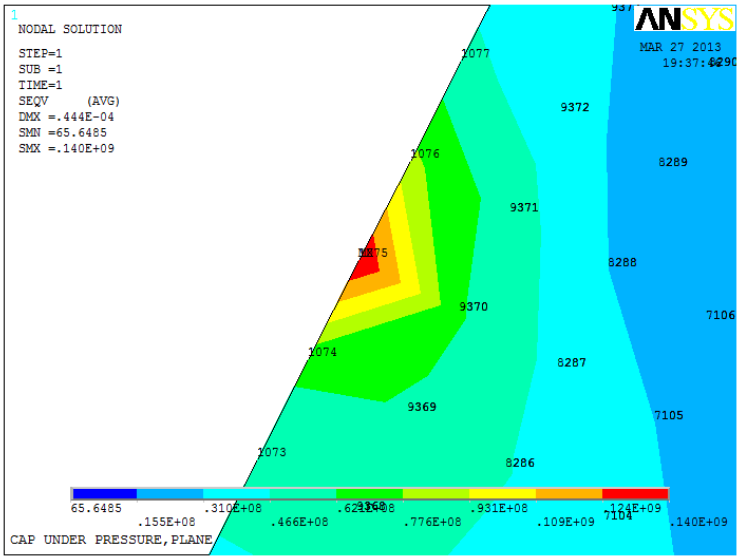


Рис. 11. Максимальные напряжения

Максимальные напряжения составили 140 МПа (т.е. равны пределу текучести материала колпака) в узле №1075 вблизи закреплений (узлы №№1076-1216) при воздействии на оболочку избыточного давления 57атм.

Сведем полученные результаты в табл. 1.

Таблица 1. Результаты исследования

Метод исследования	Значение разрушающего давления, атм.
Эксперимент	61
Решение с помощью формулы Лапласа	58,5
Конечно-элементный расчет в среде ANSYS	57

Можно заключить, что расчет на прочность запорного колпака быстродействующего пневматического клапана возможен как с использованием формулы Лапласа, так и методом конечных элементов в программе ANSYS. Оба метода дают достоверные результаты, близкие к полученным в результате эксперимента. Разница экспериментального и теоретического значений давления может быть объяснена тем, что рассматривалась модель без зазора колпака и металлических частей клапана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов В.В. Механика композиционных материалов: учеб. пособие / В.В. Носов СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.-165 с.

2. Беляев В. М., Миронов В. М. Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли. Ч. I: Тонкостенные сосуды и аппараты химических производств: Учеб. пособие/ Том. политех. ун-т. – Томск, 2003. – 168 с.
3. Патент РФ № 2284871. Система для стряхивания зависаний сыпучих материалов, пневмоимпульсное устройство для стряхивания зависаний сыпучих материалов и способ стряхивания.
4. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272с.

УДК 621.89.099.6, 532.135

М.Н. Попова

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНДУСТРИАЛЬНОГО МАСЛА С ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИМИ ЖК-ПРИСАДКАМИ И УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ



Майя Николаевна Попова, студентка, стажёр-исследователь
НИИ Наноматериалов
Ивановский государственный университет
Россия, Иваново
Тел.: 8(910)990-80-49, E-mail: maiapopova7@gmail.com

Аннотация

Проведены триботехнические испытания трехкомпонентных смесей: индустриальное масло – холестериловые эфиры карбоновых кислот (Х-7, Х-10, Х-16 и Х-20) – многостенные углеродные нанотрубки. Получены величины коэффициентов трения и износные показатели (площадь пятна износа) в паре трения в присутствии индустриального масла И-20А и опытных смазочных композиций.

Ключевые слова: трибологические свойства, трибоактивные присадки, коэффициент трения, площадь пятна износа, холестерические жидкие кристаллы, углеродные нанотрубки

M. N. Popova

TRIBOLOGIC PROPERTIES OF INDUSTRIAL OIL WITH CHOLESTERIC LIQUID CRYSTALLINE ADDITIVES

Maya Nikolaevna Popova, Ivanovo State University, Research Institute of nanomaterials, Russia, e-mail: popovamaia7@gmail.com

Abstract

We have conducted tribotechnical tests of ternary mixtures: industrial oil – cholesteryl ethers of carboxylic acids (Ch-7, Ch-10, Ch-16 and Ch-20) – many-walled carbon nanotubes. The magnitudes of friction coefficients and of deterioration rate (wear scar area) were obtained for contacting pair in presence of industrial oil and experimental lubricant composites.

Key words: tribological properties, triboactive additives, coefficient of friction, wear scar area, cholesteric liquid crystals, carbon nanotubes

Введение

Уменьшение износа современной техники, т.е. увеличение срока её службы, а также повышение интенсивности её работы, являются приоритетными задачами современной трибологии. Самым простым и эффективным способом решением данных проблем является использование смазочных материалов.

Известно, что холестерические жидкие кристаллы (ЖК) проявляют себя как эффективные присадки к смазочным маслам, поскольку оказывают структурирующее воздействие на граничный слой трибосопряженных деталей [1, 2]. Способность ЖК адсорбироваться на поверхностях в процессе динамического контакта и послойное упорядочение, при котором наблюдается легкое течение одного слоя относительно другого, лежат в основе механизма смазочного действия ЖК и ЖК-присадок [1, 3]. Анизометрия молекул холестерических жидких кристаллов (ХЖК) и обусловленная ею специфика межмолекулярных взаимодействий оказывают влияние на процессы взаимодействия на границе раздела твёрдое тело – жидкая смазочная среда. ХЖК могут структурироваться не только у опорной поверхности материала, но и на удалении от неё и одновременно проявляют свойства жидкости [5].

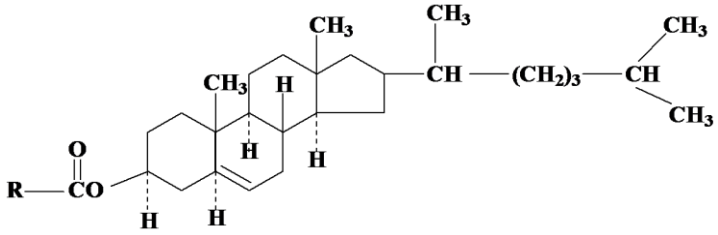
Кроме того, использование мезогенов, является также решением экологических проблем современности, т.к. жидкокристаллические соединения не обладают токсичными и канцерогенными свойствами и способны к полному биоразложению при попадании в окружающую среду [5].

В качестве другой присадки к маслу, были выбраны углеродные нанотрубки (УНТ), т.к. при добавлении УНТ существенно меняются трибологические свойства материалов и фрикционных изделий из них [6, 7].

Экспериментальная часть

С целью улучшения трибологических характеристик, а именно для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости индустриального масла И-20А, нами были приготовлены устойчивые к седиментации двухкомпонентные и трёхкомпонентные смеси, в состав которых входили индустриальное масло И-20А как основа, ЖК-присадки и микродобавки многостенных углеродных нанотрубок (УНТ). Опытные смазочные композиции готовили на ультразвуковой бане SONOREX SUPER. Исследование трибологических свойств смесей проводилось на машине трения 2070 СМТ – 1, по схеме «вращающийся ролик – неподвижный шар». Материал диска – сталь 45, материал шарика – сталь ШХ-15. Скорость скольжения составляла 1 м/с. Частота вращения – 500 оборотов в минуту. Нагрузка на образец постоянная – 200 Н. Температура измерялась хк – термопарой. Длительность каждого эксперимента составляла 16 минут.

В качестве ЖК-присадок нами использовались холестериловые эфиры карбоновых кислот: стеариновой (Х-7), пропионовой (Х-10), олеиновой (Х-16) и тридекановой (Х-20). На рис. 1 представлены графические формулы используемых холестериловых эфиров, а в таблице 1 даны их физико-химические характеристики.



(X-7) $R = CH_3-(CH_2)_{17}-$

(X-10) $R = CH \equiv C-$

(X-20) $R = CH_3(CH_2)_{11}-$

(X-16) $R = CH_3\left[(CH_2)_7CH=\right]_2-$

Рис. 1. Графические формулы используемых ЖК-присадок.

Таблица 1

№	Название ЖК-присадки	Брутто-формула	Температура плавления, °C	Температура просветления, °C
1.	Холестериловый эфир стеариновой кислоты (Х-7)	$C_{45}H_{80}O$	≥ 76.0	≤ 86.0
2.	Холестериловый эфир пропионовой кислоты (Х-10)	$C_{30}H_{50}O_2$	96.25 ± 1.75	112.75 ± 1.25
3.	Холестериловый эфир олеиновой кислоты (Х-16)	$C_{45}H_{78}O_2$	20.0	45.0
4.	Холестериловый эфир тридекановой кислоты (Х-20)	$C_{40}H_{70}O_2$	62.0 ± 2.0	84.5 ± 1.5

В качестве наноразмерных микродобавок нами были использованы многостенные УНТ. Составы двух- и трехкомпонентных смесей (в массовых процентах), которые подвергались триботехническим испытаниям, представлены в таблице 2.

Для расчёта коэффициента трения изначально считали момент трения:

$$M=0.00001 \times x^2 + 0.0992 \times x + 0.0058 \qquad (1)$$

где x – значение, полученное из трибограмм.

Таблица 2

Двухкомпонентные смеси	Трёхкомпонентные смеси
Индустриальное масло И-20А (основа) с присадками:	
2% Х-7	2% Х-7 и 0,0001% УНТ
2% Х-10	2% Х-10 и 0,0001% УНТ
2% Х-16	2% Х-16 и 0,0001% УНТ
2% Х-20	2% Х-20 и 0,0001% УНТ

Далее рассчитывали коэффициент трения по формуле:

$$f = 2 \times M/pd \qquad (2)$$

где M – момент трения; p – нагрузка на образец; d – диаметр диска.

В ходе триботехнических испытаний нами были получены износные показатели, такие, как площадь пятна износа шарика и ширина износа дорожки ролика. Результаты расчетов и эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3

Изучаемые образцы	**Температура,С^{o}**		**Износ ролика, мм**	**Площадь пятна износа шарика, мм**	**Коэф. трения, f**
	Начало	Конец			
Масло И-20 А	19	50	0,35	0,11	0,051
Масло + Х-7	22	55	0,3	0,106	0,088
Масло + Х-7 + УНТ	19	51	0,525	0,28	0,046
Масло + Х-20	30	61	0,275	0,102	0,064
Масло + Х-20+УНТ	19	49	0,5	0,165	0,046
Масло + Х-10	19	48	0,625	0,298	0,051
Масло + Х-10 +УНТ	21	56	0,6	0,306	0,088
Масло + Х-16	24	54	0,6	0,158	0,088
Масло + Х-16 +УНТ	24	53,5	0,575	0,108	0,076

Во второй части исследования, были проведены трибологические испытания с использованием в качестве присадки холестерилового эфира стеариновой кислоты – Х-7, с различными концентрациями: 1%, 2%, 5%, 10% и 20%. Испытания проводились при нагрузке 200 Н. Результаты представлены на рис. 2, 3.

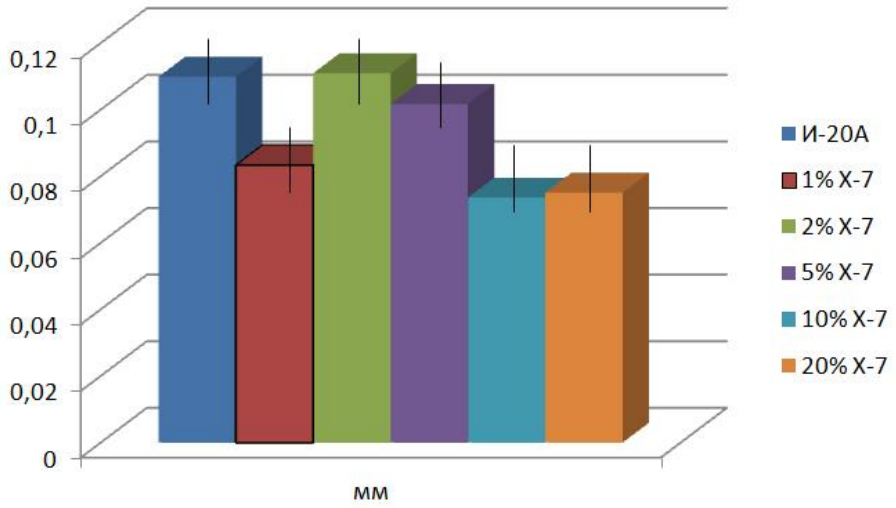


Рис. 2. Зависимость концентрации Х-7 от площади пятна износа шарика

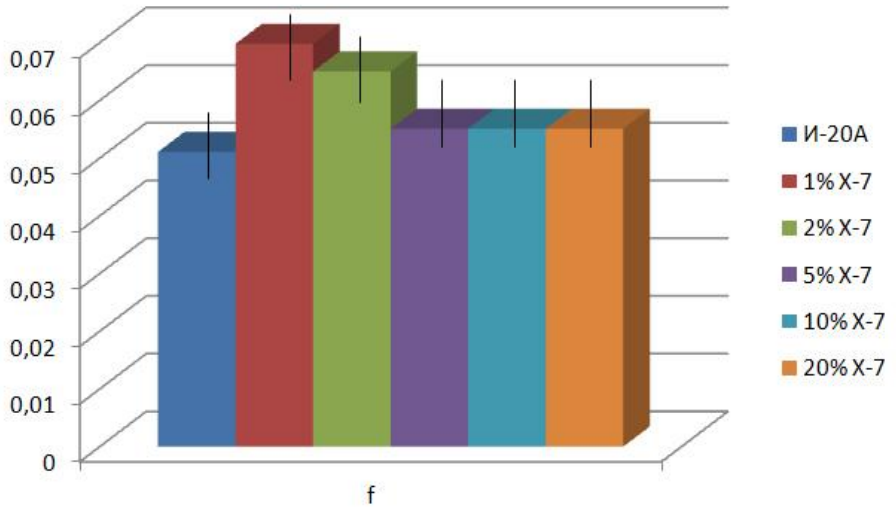


Рис. 3. Зависимость концентрации Х-7 от коэффициента трения

Выводы

В ходе проведенных экспериментальных исследований нами были получены устойчивые к седиментации двухкомпонентные и трёхкомпонентные смазочные композиции на основе индустриального масла И-20А. Анализ результатов триботехнических испытаний показал, что холестерические присадки Х-7 с микродобавкой многостенных УНТ и Х-20 с УНТ показали хорошие антифрикционные качества, а Х-7 и Х-20 являются эффективными противоизносными присадками. Приготовленные нами опытные

смазочные композиции на основе индустриального масла с ЖК-присадками Х-10 и Х-16 и микродобавками УНТ при весовых соотношениях компонентов, указанных в табл. 2, не дали положительного результата в отношении понижения коэффициента трения и повышения износных показателей.

Было установлено, что введение присадки холестерилового эфира стеариновой кислоты – Х-7 в индустриальное масло И-20А, с разными значениями концентраций, существенно способствует увеличению показателей износостойкости пар трения. Однако при этом наблюдалось некоторое повышение показателей коэффициента трения. Присадка Х-7 с концентрацией 20% проявила себя как хорошая загущающая присадка.

Возможность варьировать состав и весовое соотношение компонентов в опытных смазочных композициях, а также возможность смены режимов проведения триботехнических испытаний позволяют нам говорить о перспективности исследований в данной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годлевский В.А., Усольцева Н.В. Поверхностные явления и мезоморфизм. - Иваново, изд. «Ивановский государственный университет», 2011. - С.179.
2. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки. Строение, свойства, применения. - Москва «БИНОМ. Лаборатория знаний», 2006. - 290 с.
3. Ермаков С.Ф. Трибофизика жидких кристаллов. - Гомель: ИММС НАН Беларуси. 2008. - 232 с.
4. Суслов А.А., Ермаков С.Ф. Жидкие кристаллы в триботехнике (обзор) // Материалы, технологии, инструменты. 2 (1977), № 1. - С. 5 – 11.
5. Усольцева Н.В., Акопова О.Б. Трибология и мезоморфизм // Физика, химия и механика трибосистем. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 10. - Иваново; Издательство «Ивановский государственный университет», 2011. - С. 14-23.
6. М. Хебда, А. В. Чичинадзе. Справочник по триботехнике. В 3-х т., т. 1: Теоретические основы. - М.: Машиностроение, 1989. - 400 с.
7. Шилов М.А., Кузнецов С.А. О возможности моделирования наноструктуру-рированного смазочного слоя // Материалы II Международного форума по нанотехнологиям. – М., 2009. - С. 255 – 257.
8. Учеб. пособие / Ермаков С.Ф.; под ред. Ермакова С.Ф., Родненкова В.Г., Белоенко Е.Д., Купчинова Б.И. Жидкие кристаллы в технике и медицине. - Минск «Асар», 2002. - С 38.
9. Учеб. пособие / Томишко М.М.; под ред. Томишко М.М., Демичева О.В., Данилова В.Д., Покровского, Е.М., Скородумова В.Ф. - Научная сессия МИФИ-2007. Сб. науч. тр., 2007, т. 9. - С. 195—197.

УДК 62-412.002.5+669.018.258

Н.А. Родионов

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВ ШАРНИРНО-РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ



Николай Александрович Родионов, аспирант,
ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет",
ул. Артема, 58, Донецк, 83001, Украина
Тел.: +38 (062) 301-08-39, E-mail: r-n-a@ukr.net.

Аннотация

В работе произведено моделирование силового нагружения шарниров и опор шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовки. Выполнено исследование влияния нагрузки уравновешивающих амортизаторов на долговечность подшипников механизма. Получены оптимальные значения давления воздуха в амортизаторах, при которых обеспечивается максимальный срок службы подшипников.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, механизм качания кристаллизатора, подшипник, долговечность, сила реакции, давление, амортизатор.

N.A. Rodionov

STUDY OF BEARINGS DURABLE OF CCM MOULD HINGED-LEVER OSCILLATOR

Nikolai Rodionov, Donetsk National Technical University, Ukraine,
e-mail: r-n-a@ukr.net

Abstract

At the article force loading hinges and hinge-bearing of CCM mould hinged-lever oscillator was modeling. The research of the effect of balancing dampers load on bearing durable of mechanism was achieved. The optimal values of the pressure in the balancing dampers, which provide maximum bearing life, were obtained.

Keywords: CCM, mould oscillator, bearing, durable, reaction force, pressure, balancing damper.

В практике непрерывной разливки на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) большое распространение получили шарнирно-

рычажные механизмы качания кристаллизатора (МКК). Они, в своем большинстве, представляют собой параллелограммные рычажные механизмы, которые обеспечивают циклическое перемещение выходного звена (стола качания) с установленным на нем кристаллизатором вдоль заданной траектории, совпадающей с технологической осью ручья МНЛЗ.

При этом совокупность различных факторов (конструкция, параметры привода, сила трения между гильзой кристаллизатора и формирующимся в нем слитком, уравновешивающее усилие) обуславливают значительное переменное нагружение конструкционных узлов данного типа механизмов, что приводит к ускоренному износу и преждевременному выходу из строя подшипников их шарниров и опор. Износ подшипников МКК проявляется в виде увеличения суммарного радиального зазора, обусловленного появлением вмятин от тел качения на наружном и внутреннем кольцах, что приводит к значительным отклонениям параметров колебательного движения кристаллизатора в различных направлениях, негативно влияет на качество непрерывнолитой заготовки и может привести к прорыву жидкого металла на выходе из кристаллизатора.

Компенсация и снижение технологических и конструкционных нагрузок МКК частично выполняется с помощью установки различных уравновешивающих (демпфирующих) устройств, как правило, пружин либо пневматических амортизаторов, между столом качания и неподвижным основанием МНЛЗ [1]. Однако подобный вид уравновешивания является переменным и, ввиду воздействия на механизм многих независимых факторов, не имеет теоретического обоснования [2]. Настройка уравновешивающих устройств обычно производится опытным путем, в режиме холостого хода механизма без учета технологического нагружения, исходя из минимизации значения виброускорения стола качания [3], однако данный параметр не дает полного представления о нагружении всех подшипниковых узлов МКК. Для теоретического обоснования выбора оптимального уравновешивающего усилия, исходя из обеспечения максимальной долговечности подшипников механизма, актуальным является проведение исследования с помощью математической модели МКК его режимов нагружения с учетом вышеперечисленных факторов.

Вопросу износа подшипников различных конструкций МКК посвящено достаточное количество работ. В работе [4] показано, что увеличение суммарного зазора до 0,4 мм уменьшает необходимое время опережения кристаллизатора слитком на 23 %. В работе [5] произведено исследование работы МКК, в результате которого было показано, что распределение силового нагружения и положения зазоров в подшипниках шарниров МКК зависит от режима его работы, обусловленного усилием уравновешивающих устройств и воздействием технологической нагрузки. Однако автор не указывает конкретных параметров настройки амортизаторов, необходимых

для обеспечения минимальных нагрузок на шарниры (опоры) и привод МКК.

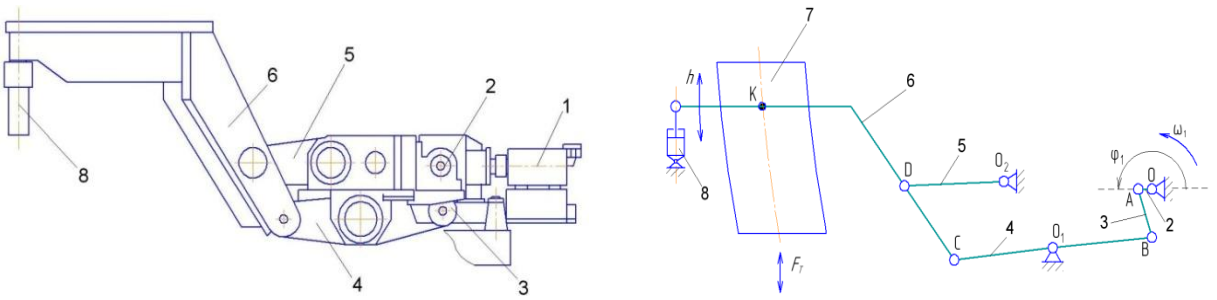
Характер износа подшипников МКК в работах [5,6] описывается как появление абразивного износа, схожее с ложным бринеллированием, проявляющегося в виде вмятин на поверхностях беговых дорожек с шагом, равным шагу тел качения. Кроме этого, в работах [7,8] указано, что одной из главных причин разрушения поверхностей беговых дорожек подшипников при взаимном их перемещении с малыми амплитудами качения, характерными для большинства шарниров и опор МКК, является фретинг-коррозия, вызванная одновременным окислением пластичной смазки и контактирующего с ней металла и развивающаяся вследствие поступающего извне воздуха. Появляющиеся в результате этого окислы железа смешиваются со смазкой и образуют абразивную массу, обуславливающую протирание вмятин на беговых дорожках подшипников.

Вместе с тем, в проанализированной литературе не рассматривается определение долговечности подшипников качения МКК исходя из условий их эксплуатации, воздействующих переменных нагрузок и уравновешивающих усилий.

Для исследования технологического нагружения шарнирно-рычажных МКК была выбрана конструкция, представленная на рис. 1. Принцип работы механизма заключается в следующем: вращательное движение привода 1 передается на эксцентриковый вал 2, с возможностью регулирования эксцентриситета, выполняющего функцию кривошипа, который через шатун 3, нижний 4 и верхний 5 рычаги преобразует вращательное движение вала 2 в возвратно-вращательное (колебательное) движения стол качания 6. Рычаги 4 и 5 расположены таким образом, чтобы сопрягаемый с ними стол качания 6, с установленным на нем кристаллизатором 7 совершал колебательное движение вдоль технологической оси МНЛЗ. Частичная компенсация силы тяжести стола качания с кристаллизатором выполняется парой пневматических амортизаторов 8. Звенья механизма соединяются между собой по средствам четырех пар шарниров *A*, *B*, *C* и *D* и базируется на трех парах опор *O*, O_1, O_2. Подшипники шарниров *C* и *D* – NNF5010ADA, опор O_1 и O_2 – NNF5016ADA – радиальные роликовые двухрядные с цилиндрическим роликами. Подшипники опоры *O* эксцентрикового вала и шарнира *B* в данном исследовании не рассматриваются, т.к. режим их работы отличается от режима качательного движения, характерного для всех остальных шарниров и опор МКК.

МКК МНЛЗ в процесс своей работы находится под действием различных переменных нагрузок (рис. 1). Прежде всего, на него воздействует сила сопротивления F_K, от трения формирующейся оболочки слитка о стенки гильзы кристаллизатора, которая зависит от параметров и условий непрерывной разливки. Кроме этого, на все узлы МКК воздействуют постоян-

ные по направлению и значению силы тяжести, знакопеременные силы инерции звеньев, и уравновешивающее усилие амортизаторов.



а) б)

Рис. 1. Общий вид (*а*) и кинематическая схема (*б*) шарнирно-рычажного МКК

В общем случае каждая сила реакции в шарнирах (опорах) МКК может быть представлена в виде функции:

$$R_i = f(\varphi_1, f_к, h, Q, F_T, \Sigma F_{i.к}),$$

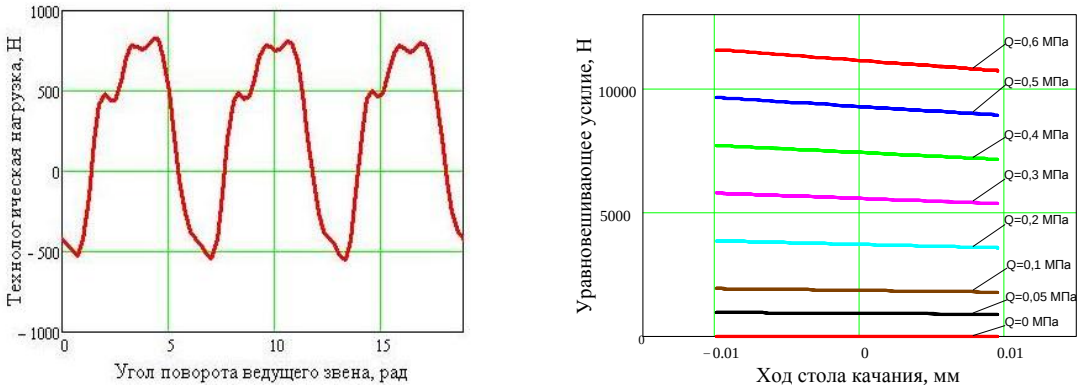
где φ_1 – угол поворота ведущего звена (эксцентрикового вала); $f_к$ – частота качания кристаллизатора; h – ход стола качания; Q – давление в уравновешивающих амортизаторах; F_T – сила трения между гильзой кристаллизатора и формирующимся слитком; $\Sigma F_{i.к}$ – силы инерции звеньев.

Технологическая нагрузка от трения формирующегося слитка о стенки гильзы кристаллизатора F_K имеет знакопеременный характер и зависит от многих факторов [9], индивидуальных для каждой МНЛЗ и режима разливки. В связи с этим, для представления технологической нагрузки как периодической функциональной зависимости от перемещения стола качания (рис. 2а), была произведена тригонометрическая аппроксимация [10] опытных данных.

Уравновешивающее усилие принятой конструкции МКК P_y обеспечивается двумя пневматическими амортизаторами, и изменяется за цикл работы механизма в зависимости от создаваемого в них давления воздуха Q=0,05…0,6 МПа (рис. 2б).

В производственных условиях, как правило, настройка МКК осуществляется регулировкой h и Q, т.к. остальные параметры жестко привязаны к технологическому процессу непрерывной разливки стали на МНЛЗ.

После проведения математического моделирования изменения кинематических и кинетостатических параметров за цикл работы МКК с учетом вышеизложенных факторов, был определен характер нагружения шарниров и опор C, D, O_1 и O_2 обусловленный силами реакции сопрягаемых ими звеньев (рис. 4).



а б

Рис.2. Параметры нагружения МКК
а) – изменение технологической нагрузки за 3 цикла качания механизма;
б) – изменение уравновешивающего усилия амортизаторов, в зависимости от перемещения стола качания и регулировки давления Q

Как видно из рисунка 4, силы реакций всех шарниров и опор имеют значительную переменную составляющую, что особенно выражено в случае опоры O_1, в подшипниках которой наблюдается самая высокая интенсивность износа. Это обуславливает зависимость интенсивности износа подшипников МКК от динамического нагружения его узлов.

Уменьшение динамической составляющей нагружения подшипников МКК может быть выполнено путем подбора определенного уравновешивающего усилия амортизаторов, воздействие которого целесообразно оценивать по его влиянию на долговечность подшипников качения механизма.

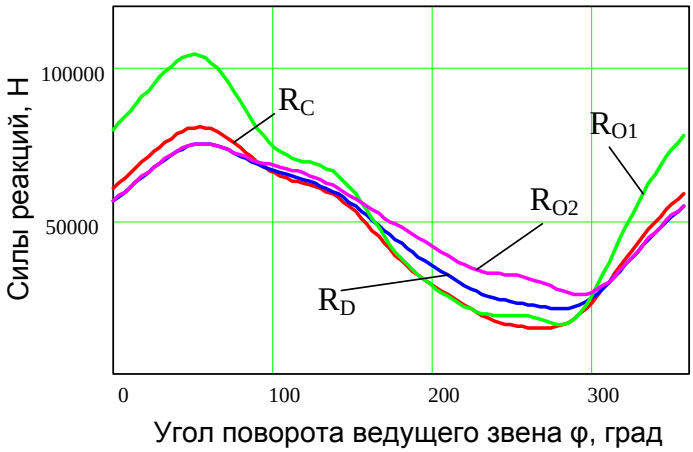


Рис.4. Изменение сил реакций шарниров и опор МКК
за цикл поворота ведущего звена, в неуравновешенном состоянии

Долговечность подшипника, работающего в режиме качательного движения, может быть представлена обратно пропорциональной коэффициенту динамичности [7,8] и определяться по следующей зависимости:

$$f = \frac{2{,}6C}{R_{\max} f_d f_{n\beta}},$$

где f – коэффициент долговечности, по значению которого определяется долговечность подшипника (чем выше значение f, тем выше долговечность [7]); C – динамическая грузоподъемность подшипника; f_d – динамический коэффициент; $f_{n\beta}$ – коэффициент, учитывающий частоту вращения звеньев в шарнире и угол поворота колец подшипника относительно друг друга β, для шарниров и опор МКК β находится в пределах 3°, тогда принимается $f_{n\beta}$=2; $R_{\max}$ – максимальное значение силы реакции приходящейся на один подшипник шарнира или опоры.

Изменения коэффициента долговечности для подшипников шарниров C, D и опор O_1, O_2 МКК, при различных значениях уравновешивающего усилия, показаны на рисунке 5.

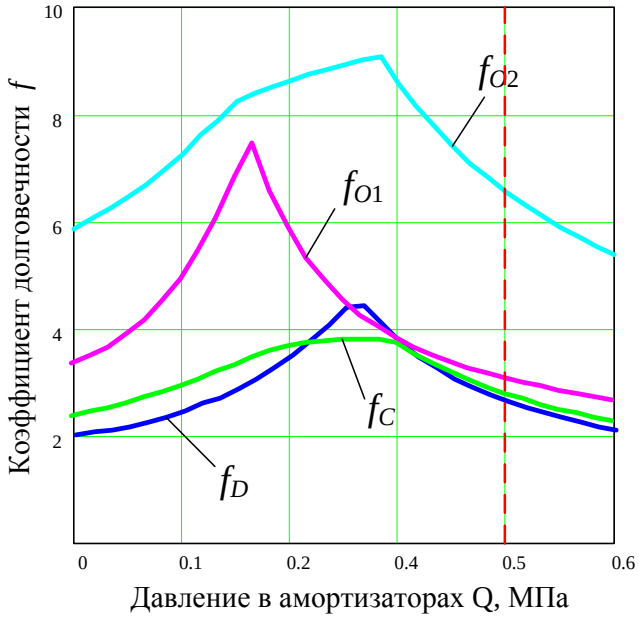


Рис.5. Изменение коэффициента долговечности
в зависимости от давления в уравновешивающих амортизаторах

Как видно из представленных графиков, для каждого шарнира либо опоры максимальное значение коэффициента долговечности достигается при различных значениях давления уравновешивающих амортизаторов. Это особенно актуально с учетом того, что в производственных условиях давление уравновешивающих амортизаторов поддерживается близким к 0,5 МПа. В таблице 2 приведены значения долговечности подшипников исследуемых шарниров и опор МКК в часах, соответствующие значениям коэффициента долговечности при давлении в уравновешивающих амортизаторах 0,5 МПа.

При давлении воздуха в уравновешивающих амортизаторах МКК 0,5 МПа, ресурс работы подшипников шарниров *C*, *D* и опоры O_1 не превышает нескольких месяцев (таблица 2). После чего развитие вмятин на беговых дорожках внешних и внутренних колец подшипников приводит к увеличению радиальных зазоров, что негативно влияет на работу МНЛЗ и процесс непрерывной разливки стали.

Таблица 2. Долговечность подшипников шарниров и опор МКК при давлении воздуха в амортизаторах 0,5 МПа

Шарнир/опора МКК	Динамическая грузоподъемность подшипника, кН	Коэффициент долговечности, f_i	Долговечность подшипника, ч
C	108	2,86	1650
D	108	2,75	1450
O_1	251	3,18	2350
O_2	251	6,5	16000

Таким образом, долговечность подшипников разных шарниров и опор исследуемой конструкции шарнирно-рычажного МКК достигает максимального значения при различных значениях давления в уравновешивающих амортизаторах, что объясняет их неравномерный износ и исключает выбор такого уравновешивающего усилия амортизаторов, при котором срок службы всех подшипников будет сопоставим и приближен к максимальному значению.

Для повышения срока службы необходимо дальнейшее изучение режимов работы подшипников МКК и характера их износа, включающее сопоставление воздействующих на них динамических нагрузок и условий работы. Это может быть произведено путем физического моделирования условий работы подшипников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О.Л. Сотніков, М.О. Родіонов. Врівноважування механізму хитання кристалізатора МБЛЗ / Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – Вып. 35. – С. 192-201.
2. В.А. Сидоров, А.Л. Сотников. Исследование влияния давления воздуха в пневмоамортизаторах механизма качания на параметры движения кристаллизатора МНЛЗ / Металлургические процессы и оборудование. – 2009. –№4. – С. 15-19.
3. Монтаж и балансировка стола качания МНЛЗ [Производственно-техническая инструкция]. – Донецк: ЗАО "ММЗ "Истил (Украина)", 2003. – 15 с.

4. Д.В. Петров. Влияние зазоров в механизме качания кристаллизатора на время опережения / Сталь. – 2007. – №4. – С. 67-69.
5. В.А. Сидоров. Анализ режимов работы столов качания сортовых МНЛЗ / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №6. – С. 90-93.
6. В.А. Сидоров, А.Л. Сотников, С.В. Птуха. Техническое обслуживание и ремонт механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / Металлургические процессы и оборудование. – 2009. –№ 4. – С. 39-43.
7. Перель Л.Я. Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 543 с.
8. Бейзельман Р.Д. Подшипники качения. Справочник. Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 572 с.
9. В.П. Ногтев. Сопоставление эффективности шлакообразующих смесей путем измерения силы трения в кристаллизаторе / Сталь. – 1999. – №11. – С. 25-26.
10. Корниенко В.С. Численные методы: Учеб. пособие. – Волгоград: Гос. с.-х. акад., 2010. – 84 с.

УДК 621. 892

Е.Б. Седакова, Ю.П. Козырев

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПОЛНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ



Елена Борисовна Седакова, к. т. н., старший научный сотрудник,
ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН,
Россия, Санкт-Петербург
тел. (812)321-47-74, E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru



Юрий Петрович Козырев, к. т. н., старший научный сотрудник
ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН,
Россия, Санкт-Петербург
тел. (812)321-47-74.

Аннотация

Рассмотрена возможность преобразования эмпирического закона изнашивания в физическую модель износа композита. Показан один из аспектов применения физической модели износа для оценки эффективности наполнения полимерных матриц на стадии разработки композитов. Построены расчетные зависимости относительной интенсивности линейного изнашивания композита по отношению к матрице в зависимости от процентного содержания дисперсного наполнителя и параметров нагружения.

Ключевые слова: износостойкость, интенсивность линейного изнашивания, композит, полимер, наполнитель, объемная концентрация, трение, износ.

E.B. Sedakova, Yu.P. Kozyrev

ESTIMATION OF FILLING EFFICIENCY OF POLYMERIC COMPOSITES OF TRIBOTECHNICAL PURPOSES

Dr. Elena B. Sedakova[1], e-mail: elenasedakova2006@yandex.ru;
Dr. Yuri P. Kozyrev[1].
[1]Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russia

Abstract

The opportunity of transformation of the empirical law of wear in physical model of wear of a composite is considered. One of aspects of application of

physical model of wear for a definition of efficiency of filling of polymeric matrixes at a stage of development of composites is shown. Calculation dependences of relative intensity of a composite linear wear in relation to a polymer matrix are constructed depending on volumetric concentration of disperse filler and loading parameters.

Key words: wear resistance, intensity of linear wear, composite, polymer, filler, volumetric concentration, friction, wear.

При создании новых полимерных композиционных материалов триботехнического назначения удобно уже на начальной стадии разработки иметь возможность относительной оценки эффективности наполнения. Для решения поставленной задачи воспользуемся разработанным ранее эмпирическим законом изнашивания (ЭЗИ) [1]. Математическим выражением ЭЗИ является соотношение, связывающее коэффициент износа K с совместной нагрузкой pv, представляющее собой произведение контактного давления p на скорость скольжения v, и имеющее вид

$$K = apve^{-bpv} + c(e^{dpv} - 1), \qquad (1)$$

где a, b, c, d – размерные коэффициенты, характерные для исследуемого материала.

В [1] показано, что ЭЗИ справедлив в широком диапазоне нагрузок и применим для определения величины K при любом pv из заданного диапазона. Выражение (1) состоит из двух слагаемых, первое из которых описывает механохимическую, а второе – механическую составляющую изнашивания. В технических исследованиях износостойкость материалов часто оценивают по величине интенсивности линейного изнашивания I_h. Используя полученные размерные коэффициенты и, учитывая, что $I_h = Kp$, возможен переход от (1) к выражению для определения I_h

$$I_h = ap^2ve^{-bpv} + cp(e^{dpv} - 1) \quad . \qquad (2)$$

Однако выражение в виде (2) пригодно для оценки величины I_h уже готового материала. Для оценки износотойкости разрабатываемых композитов требуется обобщенное выражение, учитывающее как особенности изнашивания составляющих композита, так и их взаимное влияние. В ряде работ [2, 3] отмечаются, что поверхность трибоконтакта композита состоит из чередующихся областей материала матрицы и наполнителя. Эти данные получены в результате анализа поверхности трен ия методом сканирующей электронной микроскопии. Тогда в условиях действия внешней сжимающей нагрузки контактное давление распределяется между матрицей и

наполнителем, и износостойкость композита будет зависеть от механических и триботехнических свойств этих составляющих. Заметим, что для получения выражения ЭЗИ композита в целом недостаточно знания величин размерных коэффициентов, полученных отдельно для полимерной матрицы и наполнителя, так как влияние составляющих композита на его износостойкость не подчиняется правилу аддитивности. Это подтверждается и существенным различием величин коэффициентов ЭЗИ, ответственных как за механизмы изнашивания, так и за степень влияния температуры на физико-механические характеристики. Тогда обобщенное выражение на основе ЭЗИ требует разработки условий объединения коэффициентов с учетом распределения общей нагрузки по долям, приходящимся на области выхода на поверхность трения матрицы и на структуры наполнителя. Обозначим долю внешней нагрузки, приходящейся на контактную поверхность матрицы, через β, тогда $(1-\beta)$ - доля внешней нагрузки, приходящейся на контактную поверхность наполнителя. Примем в (2) размерные коэффициенты, характеризующие I_h матрицы, как a_1, b_1, c_1, d_1, а коэффициенты, характеризующие I_h наполнителя, как a_2, b_2, c_2, d_2. При объединении ЭЗИ наполнителя и матрицы необходимо учесть полученные размерные коэффициенты. В [4] отмечалось, что величина коэффициента b в показателе степени при первом слагаемом ЭЗИ связана с процессом образования вторичных структур. В композите не могут одновременно протекать два диффузионных процесса, способствующих переносу материала для формирования вторичных структур. Представляется, что в реальном композите преобладает процесс, связанный с физико-механическими свойствами матрицы. На это указывают и то, что $b_1 >> b_2$. Тогда следует принять b_1 в качестве коэффициента в показателе степени экспоненты в первом слагаемом ЭЗИ композита в целом. В то же время вклад других коэффициентов в коэффициенты ЭЗИ композита будет определяться β.

При учете выше сказанного (2) принимает вид

$$\begin{aligned} I_h^{\,C} &= I_h^m + I_h^f = \beta^2 p^2 v a_1 e^{-b_1 pv} + \beta p c_1 (e^{d_1 pv} - 1) + \\ &(1-\beta)^2 p^2 v a_2 e^{-b_2 pv} + (1-\beta) p c_2 (e^{d_2 pv} - 1) = \\ &p^2 v(\beta^2 a_1 + (1-\beta)^2 a_2) e^{-b_1 pv} + p(\beta c_1 + (1-\beta) c_2)(e^{(\beta d_1 + (1-\beta) d_2) pv} - 1) \end{aligned}, \qquad (3)$$

где I_h^m; I_h^f – интенсивности линейного изнашивания матрицы и наполнителя соответственно.

Обозначим в (3): $a_Э = \beta^2 a_1 + (1-\beta)^2 a_2$; $b_Э = b_1$; $c_Э = \beta c_1 + (1-\beta) c_2$; $d_Э = \beta d_1 + (1-\beta) d_2$. Тогда

$$I_h^{\,C} = a_э p^2 v e^{-b_э pv} + c_э p(e^{d_э pv} - 1) \,. \qquad (4)$$

В (4) входит величина β, для определения которой в работах [5, 6] получены выражения с учетом двух различных широко применяемых технологий изготовления композиционных материалов. Так, для композитов, полученных по технологии, включающей этап перемешивания крупных частиц полимера с более мелкими частицами наполнителя, соотношения для расчета β имеет вид

$$\beta = \frac{(1-0{,}7\varphi_f)}{(1-0{,}7\varphi_f)+0{,}7\varphi_f \dfrac{E_f}{E_m}}, \qquad (5)$$

где φ_f – объемная концентрация наполнителя; E_m – модуль упругости матрицы; E_f - сопротивление деформированию структуры наполнителя.
Выражение (5) получено для композитов, имеющих пространственную структуру наполнителя [5], исходя из равенства деформаций при сжатии матрицы и наполнителя.

Для композитов другого класса, полученных по технологии введения в расплав полимера частиц наполнителя, соотношение для расчета β принимает вид

$$\beta = \frac{(1-\varphi_f^{\frac{2}{3}})}{(1-\varphi_f^{\frac{2}{3}})+\left(\dfrac{2}{Q} l_m e^{-\frac{r_f}{k_c}}+1\right)\varphi_f^{\frac{2}{3}}}, \qquad (6)$$

где r_f – линейный размер единичной частицы наполнителя; l_m – относительная длина агрегатов частиц наполнителя; Q- коэффициент усиления композита, для рассматриваемого случая Q= 3/8 [7]; k_c- постоянная размера наполнителя.

Выражение (6) получено для композитов, имеющих случайную структуру наполнителя [6] с возможностью образования агрегатов частиц нормальных к поверхности трения. При этом в условиях действия силы сжатия на боковых поверхностях агрегатов частиц дисперсного наполнителя возникают дополнительные напряжения сдвига, вызванные разностью деформаций материалов матрицы и наполнителя. Выбор величины k_c в (6) определяется тем, что наполнитель с разной дисперсностью имеет различную суммарную площадь поверхности при одном и том же его содержании. Так суммарная площадь поверхности наполнителя наноразмеров при заданной концентрации будет существенно больше аналогичной площади

наполнителя микронных размеров. На поверхности наполнителя при создании композита происходит адсорбция полимера, вследствие чего образуется слой с повышенными механическими характеристиками [8, 9]. По-видимому, за счет этого слоя в условиях действия внешней нагрузки сжатия происходит передача сдвиговых напряжений на наполнитель. Тогда, чем больше суммарная поверхность наполнителя, тем более эффективно идет передача этих напряжений. Для нахождения величины k_c построена зависимость суммарной площади частиц наполнителя от их линейного размера с последующей ее аппроксимацией экспоненциальной кривой. Таким образом получено, что при использовании наполнителя наноразмеров $k_c = 0{,}5$ мкм, а при введении наполнителя микронных размеров $k_c = 3$ мкм.

В результате при принятых допущениях получена физическая модель износа модельных композитов, математическим выражением которой является ЭЗИ с эквивалентными коэффициентами в виде (4). Покажем, что эта модель применима для оценки триботехнической эффективности наполнения полимерной матрицы. Для этого используем величину $I_C^m = I_h^C / I_h^m$. Так как наполнение в большинстве случаев преследует цель снижения интенсивности линейного изнашивания композита, то значение I_C^m дает количественную оценку этого эффекта, то есть позволяет оценить триботехническую эффективность наполнения композитов. Кроме того, величина I_C^m учитывает тот факт, что износы матриц различных композитов могут отличаться на порядки при одних и тех же типах наполнителей.

Для определения I_h^C используем выражение (4), а для определения I_h^m – выражение (2). Разложим экспоненты, заключенные в скобки в (4) и (2), в ряд Тейлора и ограничимся первыми двумя слагаемыми. В результате получим для (4)

$$e^{(\beta d_1+(1-\beta)d_2 pv} = 1+\left[\beta d_1+(1-\beta)d_2\right]pv\ , \qquad (7)$$

для (2)

$$e^{d_1 pv} = 1+ d_1 pv\ . \qquad (8)$$

Подставив выражения (7) в (4) и (8) в (2), и при учете, что $b_Э = b_1$ окончательно находим

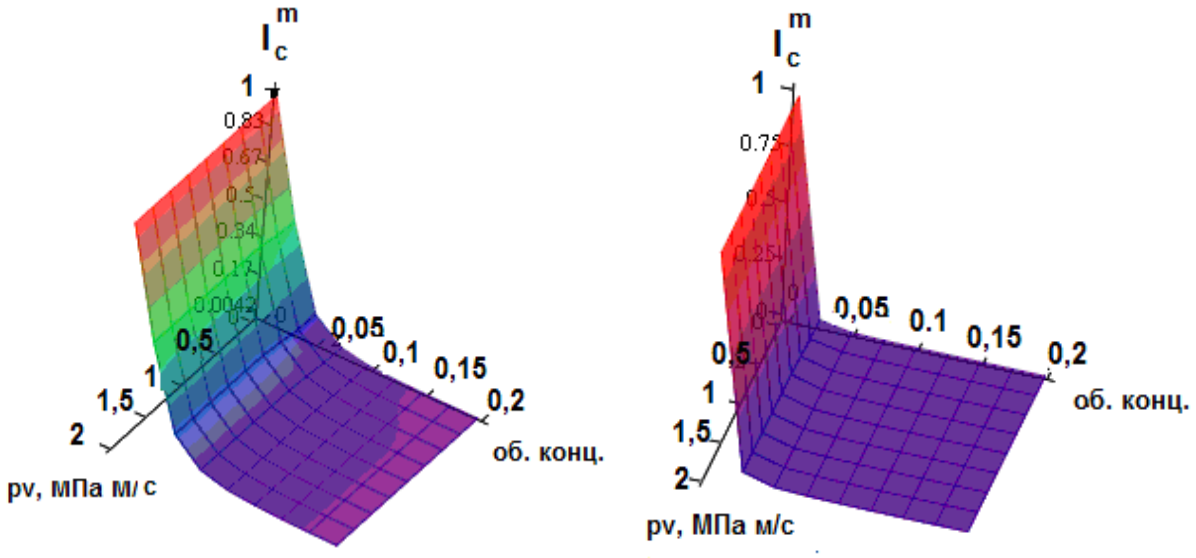
$$I_C^m = \frac{a_Э e^{-b_1 pv} + c_Э d_Э}{a_1 e^{-b_1 pv} + c_1 d_1}\ . \qquad (9)$$

Если $pv \to 0$ и $\varphi_f = 0$, то $I_C^m = 1$, так как все коэффициенты в (9) будут равны. Как следует из (9), величина I_C^m зависит только от pv. Это дает возможность строить зависимости I_C^m для различных режимов нагрузки: $p=var$, $v=const$; $v=var$, $p=const$.

Покажем применимость (9) для оценки триботехнической эффективности наполнения двух различных классов полимерных композитов: с пространственным распределением наполнителя и со случайным распределением. К первой группе относятся композиты на основе политетрофторэтилена (ПТФЭ). Ко второй группе композитов относятся материалы на основе полиамида. В качестве материала наполнителя примем мелкодисперсные фракции углеродного графитированного материала, пропитанного сплавом антифрикционных металлов, АГ-600 СО5 (ТУ 48-20-3-77). Для обеих групп композитов примем, что наполнитель в одном случае имеет микронные размеры частиц со средней дисперсностью 7 мкм, а в другом случае наполнитель имеет размер частиц, попадающий в нанодиапазон со средней дисперсностью 20 нм.

На рис. 1 по соотношению (9) построены зависимости I_C^m от объемной концентрации наполнителя и совместной нагрузки для модельных композитов на основе ПТФЭ, со средним линейным размером гранул r_p=63 мкм, наполненных АГ-600 СО5 с различной дисперсностью.

Из рис. 1 следует, что величина I_C^m практически не зависит от pv в рассматриваемом диапазоне нагрузок. Концентрационная зависимость показывает, что I_C^m снижается приблизительно на два порядка при введении наполнителя микронных размеров с концентрацией φ_f =10 об.%. (рис. 1, а), а в случае применения наполнителя наноразмеров (рис. 1, б) такое же снижение I_C^m достигается при φ_f=3 об.%.



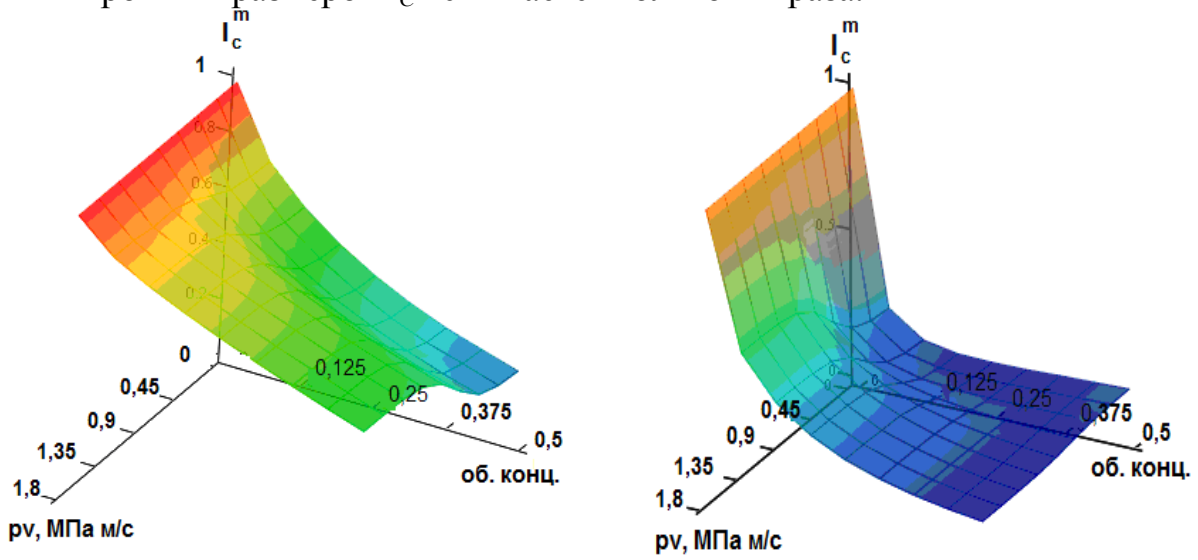
а). б).

Рис. 1. Зависимости I_C^m от φ_f и pv для модельного композита ПТФЭ+АГ-600 СО5: а). при r_p=63 мкм, r_f=7 мкм; б). при r_p=63 мкм, r_f = 20 нм.

Зависимости I_C^m от объемной концентрации наполнителя и совместной нагрузки для модельных композитов на основе полиамида, наполнен-

ных АГ-600 СО5 с различной дисперсностью, построенные по (9), приведены на рис. 2.

Из рис. 2, а следует, что I_C^m модельного композита на основе полиамида имеет существенную зависимость от *pv* в случае использования наполнителя микронных размеров. Величина I_C^m, снижается монотонно с увеличением φ_f и достигает своего минимального значения при *pv*=0,45 МПа м/с и концентрации 50 об.%. В этом случае I_C^m снижается только в 4 раза. В то же время при использовании наполнителя наноразмеров (рис. 2, б) зависимость I_C^m от *pv* менее выражена. Концентрационная зависимость I_C^m здесь имеет минимум при 12 об.% и *pv*=0,45 МПа м/с и снижается в 6 раз. Заметим, что при таком же объемном содержании наполнителя микронных размеров I_C^m снижается только в 2 раза.



а). б).

Рис. 2. Зависимости I_C^m от φ_f и *pv* для модельного композита полиамид+АГ-600 СО5: а). r_f=7 мкм; б). r_f = 20 нм.

Таким образом, разработанное на основе ЭЗИ выражение в виде (9) позволяет оценивать эффективность наполнения матриц на стадии разработки композитов с учетом величины совместной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев Ю.П., Седакова Е.Б. Многофакторный анализ механизмов износа политетрафторэтилена и его композита с использованием эмпирического закона // Вестник машиностроения. -2009. -N. 7 . -С. 43-47.
2. Li F., Hu K. A., Li J.L., Zhao B. Y. The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene // Wear. -2001. -V. 249. -N. 10-11. -P. 877-882.

3. Lai S-Q., Yue Li, Li T-S., Hu Z-M. The friction and wear properties of polytetrafluoroethylene filled with ultrafine diamond // Wear. -2006. -V. 260. -P. 462–468.
4. Седакова Е.Б., Козырев Ю.П. Приложение эмпирического закона изнашивания к вопросам прогнозирования износа композитов на основе политетрафторэтилена // Вопросы материаловедения. -2012. -N. 4. -С. 217-222.
5. , Седакова Е.Б. Влияние особенностей структуры композиционных материалов на основе политетрафторэтилена на снижение нагруженности матрицы // Проблемы машиностроения и надежности машин. -2010. -N. 2. -С. 40-45.
6. Козырев Ю.П., Седакова Е.Б. Влияние процесса направленной агрегации частиц на характеристики полимерных антифрикционных нанокомпозитов // Проблемы машиностроения и надежности машин. -2010. -N.4. -С. 86-91.
7. Берлин А.А., Вольфсон С.А., Ошмян В.Г., Ениколопов Н.С. Принципы создания композиционных полимерных материалов. М.: Химия, 1990. -240 с.
8. Охлопкова А.А., Петрова П.Н., Гоголева О.В. Исследование триботехнических характеристик нанокомпозитов на основе смесей полимеров // Трение и износ. -2009. -Т. 30. –N. 5. -С. 500-505.
9. Панин С.В., Корниенко Л.А., Ваннарси С., Иванова Л.Р., Шилько С.В. Сравнительный анализ влияния нано- и микронаполнителей окисленного Al на фрикционно-механические свойства СВМПЭ // Трение и износ. -2010. -Т. 31. -№5. -С. 492-499.

УДК 621.882.6

А. А. Суханов

ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ



Александр Алексеевич Суханов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 552-7801, E-mail: Alexeevich@post.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы практического применения различных болтовых соединений. Получены удобные инженерные формулы расчета возникающих напряжений в зависимости от предварительного осевого нагружения, коэффициента трения и других параметров.

Ключевые слова: болтовое соединение, момент затяжки, эквивалентное напряжение.

A. A. Sukhanov

ENGINEERING CALCULATION OF BOLTED CONNECTIONS

Dr. Alexander A. Sukhanov, St.Petersburg State Polytechnical University,
Russia, e-mail: Alexeevich@post.ru

Abstract

The paper deals with the practical application of the various bolt connections. Get a handy engineering formulas calculate the stress as a function of axial pre-load, friction coefficient, and other parameters.

Key words: bolt connections, torque, equivalent stress.

В существующей литературе по болтовым соединениям (см., например,[1], [5], [6]) приводятся достаточно глубокие теоретические исследования по расчету сил и напряжений в болтовых соединениях. При этом мало внимания уделяется практическому использованию полученных результатов. В справочной литературе (см., например, [7]) наоборот, приводятся практические таблицы по применению конкретных болтов в зависимости от марки стали материала болта, однако отсутствуют аналитические зависимости, позволяющие расширить таблицы для других значений параметров (трение, момент затяжки и т.д.).

В настоящей работе заполняется пробел между теорией и практикой

болтовых соединений. Приводится классификация болтовых соединений и выводятся простые и удобные инженерные формулы для расчетов сил, напряжений, моментов затяжки, коэффициентов запаса.

1. Назначение и режимы болтовых соединений

Болтовые соединения предназначены для надежного соединения двух и более деталей при помощи болта, гайки и, возможно, обычных и/или гровер-шайб (рис. 1). Возможен также частный случай винтового соединения, когда болт вворачивается в одну из деталей, которая по сути является гайкой.

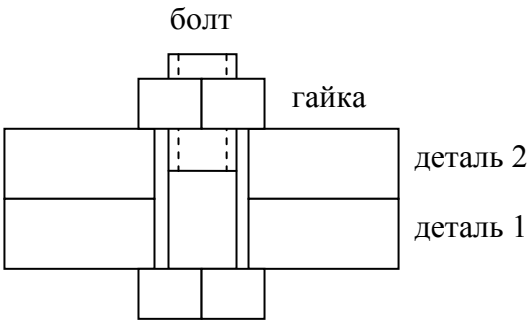


Рис. 1. Болтовое соединение

Существуют 3 принципиально различных режима работы болтового соединения.

1.1. Штифтовой режим соединения

В режиме штифтового соединения болт надежно фиксирует соединенные детали, препятствуя их поперечному (касательному) смещению под действием сил Q. При этом болт устанавливается в отверстия (обычно из-под развертки) без зазора или даже с небольшим натягом (рис. 2). Фактически такие болты, называемые призонными, играют роль штифтов, работающих на срез.

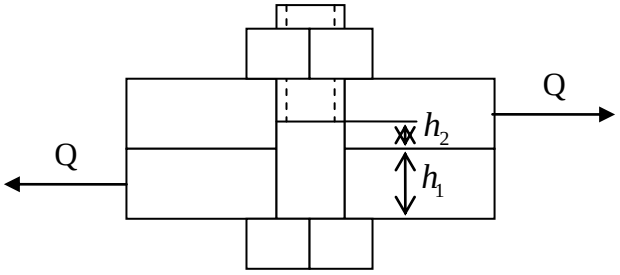


Рис. 2. Штифтовое соединение

Чтобы не перегружать болт дополнительными напряжениями, в штифтовом режиме крепящая гайка закручивается небольшим моментом

затяжки $M_з^{\min}$, создающим небольшие начальные осевое растягивающее усилие $F_0^{\min}$ и касательное напряжение $\tau^{\min}$.

1.2. Режим продольного удержания

В режиме продольного удержания болт с гайкой надежно фиксируют соединенные детали, препятствуя их продольному (нормальному) разъединению под действием сил N (рис. 3).

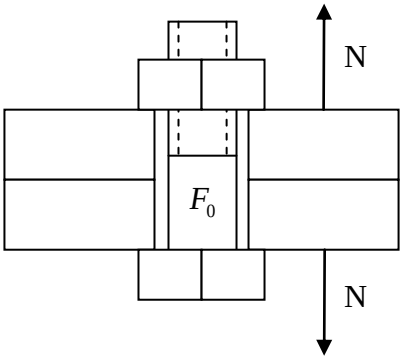


Рис. 3. Продольное удержание

Для обеспечения плотности стыка (отсутствия разъединения деталей) гайка затягивается с достаточно большим усилием оптимальным моментом затяжки $M_з^{opt}$. При этом болт испытывает средние осевое растяжение F_0^{opt} и касательное напряжение τ^{opt}.

1.3. Режим плотного соединения

В режиме плотного соединения болт с гайкой надежно фиксируют соединяемые детали, препятствуя их возможному поперечному (касательному) смещению под действием возможных поперечных сдвигающих сил Q (рис. 4).

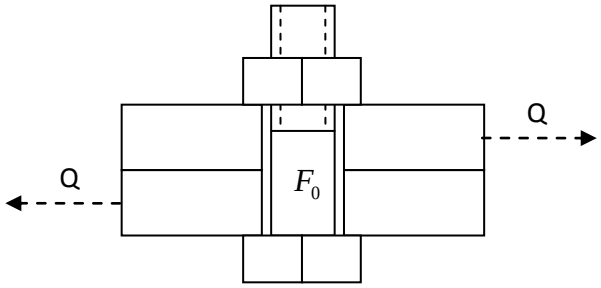


Рис. 4. Плотное соединение

В данном режиме болт испытывает только напряжения предварительной затяжки, ибо поперечные сдвигающие силы Q полностью компенси-

руются силами трения. Поэтому для обеспечения максимальной плотности соединения болт затягивается максимальным моментом затяжки $M_З^{\max}$. При этом болт испытывает максимальные осевое растяжение $F_0^{\max}$ и касательное напряжение $\tau^{\max}$.

2. Условные обозначения и принимаемые соглашения

2.1. Основные размеры и обозначения

Основные используемые в расчетах размеры болтового соединения представлены на рис. 5.

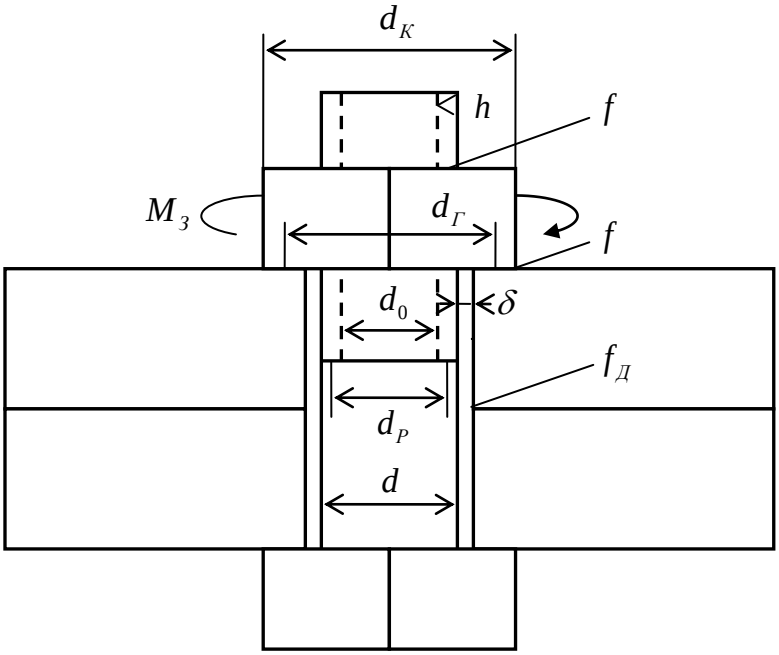


Рис. 5. Основные параметры болтового соединения

d - номинальный (наружный) диаметр болта

d_0 - внутренний диаметр резьбы (диаметр сплошного тела болта)

$d_P = \frac{d_0 + d}{2}$ - средний диаметр резьбы

d_K - размер гайки под ключ

$d_Г$ - средний диаметр опорного кольца контакта гайки

h - шаг резьбы

δ - зазор в отверстии

f - коэффициент трения пар болт/гайка, гайка/шайба

$f_Д$ - коэффициент трения между соединяемыми деталями

$S = \frac{\pi d^2}{4}$ - номинальная площадь поперечного сечения болта

$S_0 = \frac{\pi d_0^{\,2}}{4}$ - площадь поперечного сечения болта под резьбой

$k_0 = \frac{d_0}{d}, \quad k_P = \frac{d_P}{d}$ - коэффициенты резьбы

$k_Г = \frac{d_Г}{d}$ - коэффициент гайки

$M_З$ - момент затяжки гайки

2.2. Принимаемые соглашения

1) Коэффициент трения скольжения f в значительной степени зависит от состояния соприкасающихся поверхностей, в частности, от чистоты обработки и наличия смазки. Для стальных деталей

$$f = 0.12 - 0.15 - 0.18,$$

где нижнее значение соответствует смазанным поверхностям, а верхнее – грубо обработанным сухим [1]. В качестве средних и наиболее употребимых значений коэффициентов трения будем принимать

$$f = 0.15, \quad f_Д = 0.18. \qquad (1)$$

Тогда при определении реального момента затяжки гайки необходимо будет уменьшить полученные значения на 20 % при смазанных поверхностях и увеличить на 20 % при грубо обработанных. Но мы также получим и аналитические зависимости напряжений и моментов от коэффициента трения.

2) Для расчетов напряжений и моментов необходимо знать средний диаметр резьбы d_P и средний диаметр опорного кольца контакта гайки $d_Г$. К сожалению, соответствующие коэффициенты k_P и $k_Г$ не являются постоянными. В частности, коэффициенты k_0 и k_P зависят не только от шага резьбы h, но и от диаметра болта d. Коэффициенты k_0, например, принимает значения для **стандартной** метрической резьбы в диапазоне от 0.8 для небольших, 0.85 для средних и до 0.9 для крупных болтов [2]. Коэффициент $k_Г$ также немного зависит от зазора в отверстии δ и от диаметра болта, что обусловлено стандартизацией ряда размеров гаек под ключ $d_K \approx 1.5d$ [3]. Поскольку чувствительность расчетов от указанных коэффициентов невысокая, будем опираться на следующие их средние значения (для **стандартной** средней резьбы и **стандартной** гайки**)**

$$k_0 = 0.85, \quad k_P = \frac{k_0 + 1}{2} = 0.925, \quad k_Г = 1.35. \qquad (2)$$

3) Расчет болтов на прочность будем проводить согласно критерию Губера-Мизеса [4], в соответствии с которым эквивалентное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_Э = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}, \quad (3)$$

где σ_1, σ_2, σ_3 - главные напряжения. При одноосном растяжении и закручивании болта (именно наш случай) формула (4) принимает вид

$$\sigma_Э = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}, \quad (4)$$

где σ - нормальное (растягивающее) напряжение, τ - касательное (тангенциальное) напряжение.

4) Для обеспечения запаса прочности, необходимого в условиях некоторой неопределенности и разброса характеристик материалов, параметров сборки и условий эксплуатации, окончательный критерий прочности примем в виде

$$\sigma_Э^{\max} \le \frac{\sigma_T}{k_T}, \quad (5)$$

где $\sigma_Э^{\max}$ - наибольшее возможное эквивалентное напряжение по (5), σ_T - предел текучести материала болта, k_T - нормативный коэффициент запаса по пределу текучести. В машиностроении при статических нагрузках принимается [1]

$$k_T = 1.2 - 2.0. \quad (6)$$

При этом коэффициент запаса должен быть тем больше, чем меньше достоверность расчета и выше требования надежности. При динамических (переменных, циклических) нагрузках коэффициент запаса рекомендуется увеличить примерно в полтора раза [1].

Примем для статических нагрузок наиболее типичный и удобный для теоретических выводов следующий коэффициент запаса по пределу текучести

$$k_T = \sqrt{2} = 1.414. \quad (7)$$

5) Расчет болтового соединения заключается в выборе материала болта, допустимого минимального диаметра болта и требуемого момента затяжки гайки, гарантирующих надежную работу болтового соединения при заданных продольных или поперечных нагрузках. Поскольку диаметры болтов строго гостированы, будем решать обратную эквивалентную задачу: по заданным характеристикам выбранного болта будем определять максимальные допустимые нагрузки с учетом заданного коэффициента запаса (7). Если реальные нагрузки будут меньше максимально допустимых, то по формулам пересчета найдем реальный коэффициент запаса, который будет выше значения (7).

3. Расчет предварительно напряженного состояния болта

Во всех режимах работы болтового соединения для обеспечения плотности стыка болты предварительно нагружаются осевым усилием за-

кручиванием гайки моментом затяжки $M_З$. Этот момент зависит от предела текучести материала болта и выбирается в зависимости от режима работы так, чтобы начальное осевое напряжение в сплошном теле болта (в поперечном сечении под резьбой) было в пределах [1]

$$\sigma_0 = \frac{F_0}{S_0} = (0.4-0.6)\sigma_T, \tag{8}$$

где F_0 – осевое усилие предварительно напряженного болта.

Найдем зависимость между $M_З$ и σ_0 и обоснуем выбор (8). Момент затяжки состоит из двух частей:

$$M_З = M_Г + M_Р, \tag{9}$$

где $M_Г$ – момент трения на торце гайки (момент гайки), $M_Р$ - момент трения в резьбе (момент резьбы).

Момент гайки приближенно определяется по формуле

$$M_Г = f F_0 \frac{d_Г}{2} = \frac{k_Г}{2} f F_0 d. \tag{10}$$

Для определения момента резьбы рассмотрим силы давления и трения в метрической винтовой паре болт + гайка (рис. 6). Здесь α – угол профиля резьбы, ψ – угол подъема резьбы. Для метрической резьбы

$$\alpha = 60°, \quad \psi \approx 2°.$$

Запишем уравнения баланса сил на касательную и вертикальную оси.

$$F_\tau = fR\cos\psi + R\sin\psi$$

$$F_0 = R\cos\frac{\alpha}{2}\cos\psi - fR\sin\psi$$

Здесь R – нормальная реакция в резьбе. Исключая R, найдем момент резьбы

$$M_Р = F_\tau \frac{d_Р}{2} = \frac{f + tg\psi}{\cos\frac{\alpha}{2} - f \cdot tg\psi} F_0 \frac{d_Р}{2}. \tag{11}$$

Отметим, что (11) в точности совпала с аналогичной формулой в [5].

Тогда момент затяжки равен

$$M_З = M_Г + M_Р = \left(f\frac{k_Г}{2} + \frac{f + tg\psi}{\cos\frac{\alpha}{2} - f \cdot tg\psi}\frac{k_Р}{2} \right) F_0 d. \tag{12}$$

Раскладывая (12) в ряд Тейлора по степеням f в окрестности нуля, получим

$$M_З = \left(0.01837 + 1.2098 f + 0.0212 f^2 + 0.00084 f^3 + 3.35\cdot 10^{-5} f^4\right) F_0 d.$$

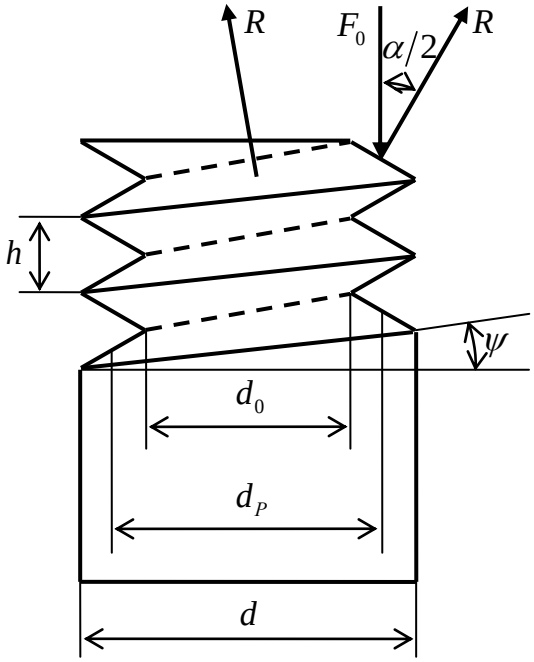


Рис. 6. Винтовая пара болт + гайка

Отбрасывая нелинейные слагаемые и округляя, получаем простую формулу для момента затяжки

$$M_З = (0.02 + 1.2f)F_0 d = (0.02 + 1.2f)\sigma_0 S_0 d\,. \qquad (13)$$

Интересно отметить, что при отсутствии подъема резьбы ($\psi = 0$) разложение в ряд дает

$$M_З = 1.2 f F_0 d\,,$$

т.е. подъем резьбы привносит постоянное слагаемое

$$M_З = 0.02 F_0 d\,.$$

При трении $f = 0.12 - 0.15$ получим простую приближенную формулу для момента затяжки в зависимости от заданного начального осевого напряжения σ_0:

$$M_З = (0.18 - 0.2)\sigma_0 S_0 d = (0.18 - 0.2)\sigma_0 \frac{\pi d_0^{\,2}}{4} d = (0.18 - 0.2)\sigma_0 \frac{\pi k_0^{\,2}}{4} d^3 \approx 0.1\sigma_0 d^3\,,$$

что в точности соответствует [5, с.106].

Для определения наибольшего эквивалентного напряжения в болте от начального момента затяжки найдем наибольшее касательное напряжение:

$$\tau_0 = \frac{M_P}{W_p}\,, \qquad (14)$$

где W_p – полярный момент сопротивления сечения под резьбой:

$$W_p = \frac{J_p}{d_0/2} = \frac{\pi d_0^{\,3}}{16} = \frac{S_0}{4} d_0 \ , \qquad (15)$$

где $J_p = \pi d_0^{\,4}/32$ – полярный момент инерции сечения под резьбой. Подставляя (11) и (15) в (14), получаем

$$\tau_0 = \frac{f + tg\psi}{\cos\frac{\alpha}{2} - f \cdot tg\psi} 2\frac{k_P}{k_0}\sigma_0 = \frac{f + 0.0344}{\frac{\sqrt{3}}{2} - 0.0344 f} 2.17647 = a\sigma_0 \ , \qquad (16)$$

где $a = 0.4662$ при $f = 0.15$.

Таким образом, наибольшее эквивалентное напряжение в предварительно затянутом болте с осевым напряжением σ_0 находится по формуле

$$\sigma_Э = \sqrt{\sigma_0^{\,2} + 3\tau_0^{\,2}} = \sqrt{1 + 3a^2}\,\sigma_0 \ . \qquad (17)$$

Раскладывая подкоренное выражение в (17) в ряд Тейлора по степеням f в окрестности нуля с учетом (16), получим с достаточно большой точностью

$$\sigma_Э = \sqrt{1 + 1.3 f + 20 f^2}\,\sigma_0 \ . \qquad (18)$$

При среднем уровне трения $f = 0.15$ получим

$$\sigma_Э = 1.3\sigma_0 \ , \qquad (19)$$

что в точности соответствует [5, с.109].

При малом трении с $f = 0.12$ будем иметь

$$\sigma_Э = 1.2\sigma_0 \ .$$

При большом трении с $f = 0.18$ будем иметь

$$\sigma_Э = 1.4\sigma_0 \ .$$

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести предварительно напряженного болта определяется по формуле

$$k_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_Э} \ . \qquad (20)$$

При максимальной затяжке $\sigma_0 = 0.6\sigma_T$ при отсутствии других нагрузок будем иметь при $f = 0.15$ минимально допустимый коэффициент запаса

$$k_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_Э} = \frac{\sigma_T}{1.3 \cdot 0.6\sigma_T} \approx 1.3 \ .$$

4. Штифтовой режим соединения

Штифтовой режим болтового соединения (рис. 2) при отсутствии или незначительной предварительной затяжке болта (чистый штифт) является самым простым для расчета напряжений и получения максимально допустимой внешней нагрузки.

4.1. Режим чистого штифта

В режиме чистого штифта болт работает в основном на срез. При этом максимально допустимая внешняя сдвигающая нагрузка Q_0 находится с учетом (5) и (6) из условия

$$\sigma_Э = \sqrt{3}\,\tau \le \frac{\sigma_T}{k_T}\ , \tag{21}$$

где касательное напряжение τ равно

$$\tau = \frac{Q_0}{S} = \frac{Q_0}{\pi d^2/4}\ . \tag{22}$$

Подставляя (22) в (21), получаем максимально допустимую внешнюю сдвигающую нагрузку

$$Q_0 = \frac{1}{\sqrt{3}k_T} S\sigma_T\ . \tag{23}$$

При $k_T = \sqrt{2}$ имеем

$$Q_0 = \frac{1}{\sqrt{6}} S\sigma_T = 0.4 S\sigma_T = 0.1\pi d^2\sigma_T\ . \tag{24}$$

Замечание. Расчет болтов на срез по формулам (21) - (24) справедлив при условии, что напряжение смятия не превосходит эквивалентное напряжение среза, т.е. когда

$$\sigma = \frac{Q_0}{dh_i} < \sigma_Э = \sqrt{3}\,\tau = \frac{\sqrt{3}Q_0}{\pi d^2/4}\ ,$$

где h_i – минимальная толщина «перерезывающей» детали (см. рис.2). Отсюда следует, что должно выполняться условие

$$h_i > \frac{\pi d}{4\sqrt{3}} = 0.453d\,. \tag{25}$$

Неравенство (25) заведомо выполняется при соблюдении следующего простого условия

$$h_i \ge 0.5d = r\ . \tag{26}$$

Если величина сдвигающей силы Q меньше максимально допустимой (24), то коэффициент запаса по пределу текучести k_T пересчитывается согласно (23) по формуле

$$k_T = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{S\sigma_T}{Q} = \sqrt{2}\frac{Q_0}{Q}\ . \tag{27}$$

4.2. Режим с предварительной затяжкой

Режим болтового штифтового соединения с предварительной затяж-

кой болта до осевого напряжения σ_0 используется в основном для плотного и надежного соединения деталей, не допускающего их относительного смещения за счет сил трения между соединяемыми деталями. В этом случае основными напряжениями в болте будут осевое от предварительной затяжки и касательное от завинчивания гайки. Т.е. напряженно-деформированное состояние болта при таком соединении будет соответствовать состоянию предварительно затянутого болта, рассмотренного в п.3. Тем не менее, найдем выражение для эквивалентного напряжения при остаточной перерезывающей силе Q_1.

Точная формула для эквивалентного напряжения в этом случае равна

$$\sigma_Э = \sqrt{\sigma_0^{\,2} + 3\left(\tau_0 + \tau_1\right)^2}\ , \tag{28}$$

где τ_0 – касательное напряжение от завинчивания гайки (16), τ_1 - остаточное перерезывающее напряжение, определяемое по формулам

$$\tau_1 = \frac{Q_1}{S} = \frac{Q - Q_T}{S} = \frac{Q - f_Д F_0}{S} = \frac{Q - f_Д \sigma_0 S_0}{S} \quad \text{при } Q > Q_T$$
$$\tau_1 = 0 \quad \text{при } Q \le Q_T\ , \tag{29}$$

где Q - сдвигающая сила, Q_T - сила трения между соединенными деталями.

При естественном ограничении $\tau_1 \le \sigma_0$ достаточно точная аппроксимация (29) дает

$$\sigma_Э = \sqrt{1 + 3a^2}\,\sigma_0 + \frac{3a}{\sqrt{1 + 3a^2}}\,\tau_1\ . \tag{30}$$

Приближенная формула для (30) в зависимости от коэффициента трения f

$$\sigma_Э = \sqrt{1 + 1.3f + 20f^2}\,\sigma_0 + \frac{0.2 + 8f}{\sqrt{1 + 1.3f + 20f^2}}\,\tau_1\ . \tag{31}$$

При среднем уровне трения $f = 0.15$ получим

$$\sigma_Э = 1.3\sigma_0 + 1.1\tau_1\ . \tag{32}$$

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести предварительно напряженного болта, испытывающего остаточное перерезывающее напряжение, при $f = 0.15$ определяется по формуле

$$k_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_Э} = \frac{\sigma_T}{1.3\sigma_0 + 1.1\tau_1}\ . \tag{33}$$

5. Режим продольного удержания

В режиме продольного удержания (основном режиме болтового соединения, рис. 3) наряду с начальным напряжением затяжки болт испыты-

вает дополнительное осевое растягивающее напряжение, обусловленное внешней нагрузкой N.

Чтобы найти наибольшее эквивалентное напряжение в болте, получим сначала выражение для полного осевого усилия в болте от внешней нагрузки. Вследствие податливости элементов соединения это усилие, как нетрудно получить (см., например, [5]), записывается в виде

$$F = F_0 + \chi N \ , \tag{34}$$

где F – полное растягивающее усилие в болте, F_0 - сила предварительного осевого натяжения болта, χ – коэффициент основной нагрузки, в общем случае определяемый как

$$\chi = \frac{\lambda_P}{\lambda_Б + \lambda_H + \lambda_P} \ , \tag{35}$$

где $\lambda_Б$ – податливость болта, λ_H – податливость нагружаемых деталей, λ_P – податливость разгружаемых деталей. Для соединений металлических деталей коэффициент основной нагрузки лежит в пределах [5]

$$\chi = 0.2 - 0.3 . \tag{36}$$

Выражение (34) справедливо до начала раскрытия стыка при

$$N \le N^* , \tag{37}$$

где N^* – освобождающее внешнее усилие, при котором происходит раскрытие стыка. При $N > N^*$ произойдет раскрытие стыка, болт станет воспринимать всю внешнюю нагрузку и полное растягивающее усилие в болте будет

$$F = N . \tag{38}$$

Освобождающее стык усилие N^* легко находится приравниванием (34) и (38):

$$N^* = \frac{F_0}{1 - \chi} \ . \tag{39}$$

Теоретическая (при линейности упругих элементов соединения) зависимость осевого усилия в болте от внешней нагрузки представлена на рис. 7 (см. также [1]).

Чтобы не допустить раскрытия стыка при максимально допустимой внешней нагрузке N_0, последняя должна быть несколько меньше освобождающего усилия N^*. Удобно положить

$$N_0 = F_0 \ . \tag{40}$$

Тогда запас плотности стыка в соответствии с (36) и (39) будет вполне достаточен и составит

$$\frac{N^*}{N_0} = \frac{1}{1 - \chi} = 1.25 - 1.43 \ .$$

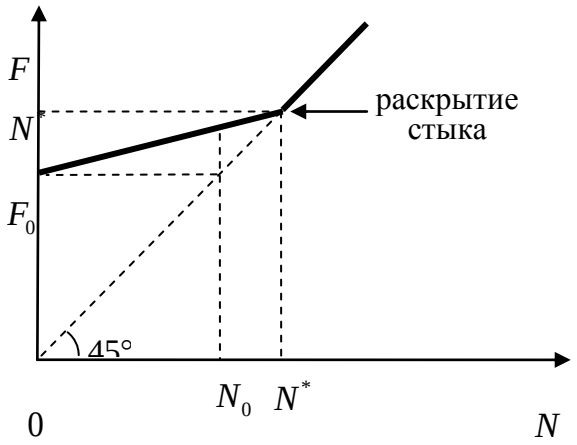


Рис. 7. Теоретическая зависимость осевого усилия в болте от внешней нагрузки

Для уточнения коэффициента χ построим зависимость полного усилия в болте от внешней нагрузки путем моделирования в пакете ANSYS работы болтового соединения, изображенного на рис. 8.

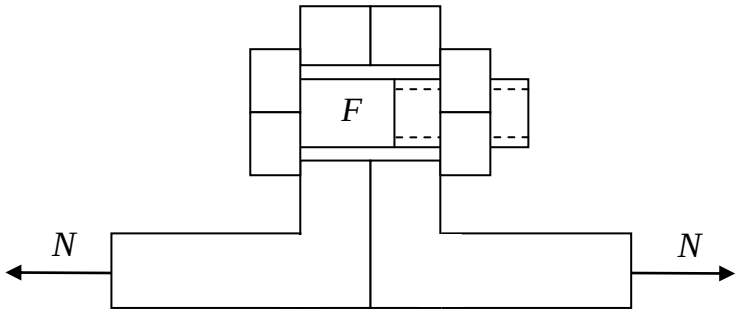


Рис. 8. Моделируемое болтовое соединения

На рис. 9 представлены результаты численного моделирования болтового соединения на рис. 8, очень хорошо согласующиеся с экспериментальными данными [6]. Небольшое отличие от теоретической кусочно-линейной зависимости (рис. 7) обусловлено наличием нелинейных контактных связей.

По результатам численного моделирования (рис.9) находим уточненное среднее значение коэффициента основной нагрузки

$$\chi = 0.25\ . \tag{41}$$

При таком коэффициенте основной нагрузки запас плотности стыка составит

$$\frac{N^*}{N_0} = \frac{1}{1-0.25} = 1.33, \tag{42}$$

что вполне достаточно для обеспечения надежного и плотного стыка.

Заметим, что чувствительность напряжения в болте к коэффициенту χ не столь велика и, стало быть, точное знание χ не так принципиально.

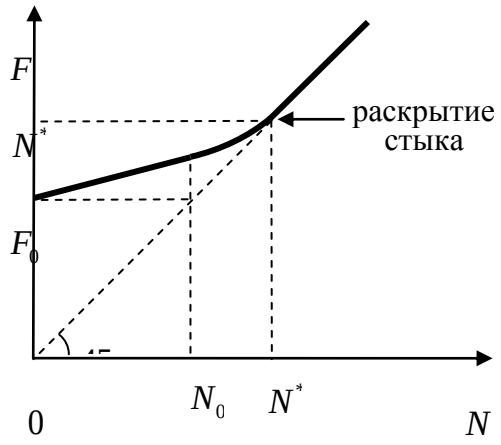


Рис. 9. Экспериментальная зависимость полного усилия в болте от внешней нагрузки

Для определения максимально допустимой внешней нагрузки N_0 и соответствующего оптимального напряжения затяжки σ_0^{opt} найдем полное осевое напряжение болта в сечении резьбы. В соответствии с (34) имеем

$$\sigma = \frac{F}{S_0} = \sigma_0 + \chi\sigma_N \ , \tag{43}$$

где $\sigma_N = N/S_0$ - напряжение нагрузки, $\chi\sigma_N$ - часть напряжения нагрузки, добавляемая к начальному осевому напряжению затяжки болта.

Рассмотрим для универсальности общий случай, когда на болт действует растягивающее напряжение σ_N и перерезывающее напряжение τ_1. Тогда точная формула для эквивалентного напряжения равна

$$\sigma_Э = \sqrt{\sigma^2 + 3\left(\tau_0 + \tau_1\right)^2} = \sqrt{\left(\sigma_0 + \chi\sigma_N\right)^2 + 3\left(\tau_0 + \tau_1\right)^2} \ . \tag{44}$$

При разумных значениях $\sigma_N \le \sigma_0$ и $\tau_1 \le \sigma_0$ (напомним, что плотность стыка обеспечивается при $\sigma_N \le \sigma_0$) достаточно точная аппроксимация (44) дает

$$\sigma_Э = \sqrt{1+3a^2}\sigma_0 + \frac{\chi}{\sqrt{1+3a^2}}\sigma_N + \frac{3a}{\sqrt{1+3a^2}}\tau_1 \ . \tag{45}$$

Приближенная формула для (45) в зависимости от коэффициента трения f

$$\sigma_Э = \sqrt{1+1.3f+20f^2}\sigma_0 + \frac{\chi}{\sqrt{1+1.3f+20f^2}}\sigma_N + \frac{0.2+8f}{\sqrt{1+1.3f+20f^2}}\tau_1 . \tag{46}$$

При среднем уровне трения $f = 0.15$ получим

$$\sigma_Э = 1.3\sigma_0 + 0.8\chi\sigma_N + 1.1\tau_1 \ . \tag{47}$$

Отметим, что в аналогичной формуле [5, с.115] во втором слагаемом нет коэффициента 0.8, а третье слагаемое вообще отсутствует.

При $\chi = 0.25$ формула (47) принимает простой и удобный для инженерных расчетов вид

$$\sigma_Э = 1.3\sigma_0 + 0.2\sigma_N + 1.1\tau_1 \ . \qquad (48)$$

Найдем в этом случае оптимальную затяжку болта при отсутствии перерезывающего напряжения ($\tau_1 = 0$), обеспечивающую максимально допустимое растягивающее напряжение ($\sigma_N = \sigma_0$). В соответствии с (48)

$$\sigma_Э = 1.3\sigma_0 + 0.2\sigma_0 = 1.5\sigma_0 \ .$$

При допустимом коэффициенте запаса

$$k_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_Э} = \sqrt{2}$$

имеем

$$\sigma_o^{\,opt} = \frac{\sigma_Э}{1.5} = \frac{\sigma_T}{1.5\sqrt{2}} = 0.4714\sigma_T \approx 0.5\sigma_T \ . \qquad (49)$$

В общем случае произвольных нагрузок $\sigma_N \le \sigma_0$ и $\tau_1 \le \sigma_0$ при $f = 0.15$ и $\chi = 0.25$ коэффициент запаса вычисляется по формуле

$$k_T = \frac{\sigma_T}{1.3\sigma_0 + 0.2\sigma_N + 1.1\tau_1} \ , \qquad (50)$$

где напряжение затяжки σ_0 выбирается из диапазона (8).

Замечание. При изготовлении болтов из высокопрочных сталей, например, Стали 40Х с $\sigma_T = 785 МПа$, в целях уменьшения нагрузок на другие элементы конструкции рекомендуется несколько уменьшить затяжку болта по сравнению с оптимальным значением (49) до величины

$$\sigma_0 = 0.4\sigma_T \ . \qquad (51)$$

В этом случае при $f = 0.15$, $\chi = 0.25$ и отсутствии внешних нагрузок коэффициент запаса принимает наибольшее значение

$$k_T = \frac{\sigma_T}{1.3 \cdot 0.4\sigma_T} \approx 1.9 \ . \qquad (52)$$

6. Режим плотного соединения

В режиме плотного соединения (рис. 4) болт испытывает только напряжения предварительной затяжки. Поэтому для обеспечения максимальной плотности соединения и наибольшей удерживающей поперечной силы Q болт затягивается максимальным моментом затяжки $M_З^{\max}$ до получения максимально допустимого эквивалентного напряжения. Согласно (18) в этом случае при малом уровне трения $f = 0.12$ имеем

$$\sigma_Э = 1.2\sigma_0,$$

откуда для принятого значения коэффициент запаса по текучести $k_T = \sqrt{2}$ в соответствии с (20) получаем с округлением в большую сторону

$$\sigma_0^{\max} = \frac{\sigma_T}{1.2k_T} = \frac{\sigma_T}{1.2\sqrt{2}} = 0.59\sigma_T \simeq 0.6\sigma_T \ . \qquad (53)$$

Соответствующий максимальный момент затяжки болта согласно (18) и (53) составит

$$M_З^{\max} = 0.093d^3\sigma_0^{\max} \approx 0.06d^3\sigma_T \ . \qquad (54)$$

Найдем наибольшую удерживающую поперечную силу $Q^{\max}$. Она определяется исключительно силой трения между соединенными деталями. При $f_Д = 0.18$

$$Q^{\max} = Q_T = f_Д F_0^{\max} = f_Д \sigma_0^{\max} S_0 = 0.18 \cdot 0.6\sigma_T S_0 \simeq 0.1\sigma_T S_0 \simeq \frac{1}{6}F_o^{\max} \ . \qquad (55)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
2. ГОСТ 24705-2004. Резьба метрическая. – М.: Стандартинформ, 2005.
3. ГОСТ 10495-80. Гайки шестигранные для фланцевых соединений. - М.: Стандартинформ, 1992.
4. Павлов П.А., Паршин Л.К., Мельников Б.Е., Шерстнев В.А. Сопротивление материалов. – СПб: Изд-во «Лань», 2003. – 528 с.
5. Решетов Д.Н. Детали машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
6. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. - М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
7. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т.2. – М.: Машиностроение, 1979. – 560 с.

УДК 621.892

А.А. Шибнев

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИЕЙ



Артем Александрович Шибнев, аспирант
Ивановская государственная текстильная академия
Россия, Иваново
Тел.: 8-915-8352435, E-mail: Artem_Shibnev@bk.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы износа пряжей деталей пневмопрядильных машин. Проведены испытания на трение деталей лавсановой пряжей. После испытания лунка износа сканировалась на атомно-силовом микроскопе. Исходя из полученных снимков, были выявлены наиболее характерные виды износа.

Ключевые слова: трение, износ, атомно-силовая микроскопия.

A.A. Shibnev

RESEARCH AND ANALYSIS OF A SURFACE OF FRICTION ATOMIC-FORCE MICROSCOPY

Artem A. Shibnev, Ivanovo State Textile Academy (IGTA), Russia,
e-mail: Artem_Shibnev@bk.ru

Abstract

In work wear questions are considered by a yarn of details of pneumospinning cars. Tests for friction of dural details are carried out by a mylar yarn. After test the hole of wear was scanned on a atomic-force microscope. Proceeding from the received pictures, the most characteristic types of wear were revealed.

Key words: friction, wear, atomic-force microscopy.

Снижение износа деталей машин способствует повышению их долговечности, снижению издержек производства, повышению эффективности использования оборудования [1]. Одним из важнейших факторов износа деталей машин является трение. Чтобы повысить долговечность деталей

нужно свести трение к минимуму, а для этого нужно знать механизмы изнашивания [2].

Цель исследования состояла в изучении поверхности трения атомно-силовой микроскопией.

Одной из основных быстро изнашивающихся деталей пневмопрядильных машин является пневмокамера. [3].Она работает в сложных условиях: частота вращения достигает 100 тыс. мин$^{-1}$, трение без смазывания, наличие пыли и других абразивных частиц. В некоторых случаях срок службы камеры составляет 20-50 часов, поэтому для повышения долговечности наносят оксидные покрытия, что увеличивает срок эксплуатации на несколько порядков [4].

Чтобы не допускать чрезмерного износа стенок пневмокамеры, а следовательно и быстрого выхода ее из строя, многие производители пневмомеханических прядильных машин изготавливают пневмокамеры из стали, что значительно повышает их вес по сравнению с аналогами из алюминиевых сплавов [5].

Чтобы прийти к компромиссу вес – износостойкость, необходимо найти материал, в полной мере отвечающий данным критериям. Таким образом перспективный материал пневмокамер должен иметь небольшую массу в совокупности с приемлемыми показателями по износостойкости.

В качестве такого материала было решено испытать дисперсно-упрочненный алюминий.

Дисперсное упрочнение – прогрессивный метод получения материалов с повышенными механическими характеристиками. В настоящее время во всем мире активизируются исследования, направленные на разработку и более широкое практическое применение металломатричных КМ. Наиболее дешевыми и надежными являются композиты на основе алюминиевых сплавов, армированных тугоплавкими, высокопрочными, высокомодульными частицам. Среди отличительных свойств таких КМ можно выделить широкие функциональные и технологические возможности, повышенную износостойкость, высокие прочность, жесткость и вязкость, малую плотность, что обеспечивает снижение массы изделий с одновременным повышением надежности и увеличением ресурса работы. [6]

В дисперсно-упрочнённом материале матрица из металла или сплава упрочняется искусственно введенными мелкодисперсными частицами. Одновременное повышение прочности и износостойкости материала данного типа достигается формированием определенного структурного состояния, при котором эффективное торможение равномерно распределенных в объеме матрицы дислокаций сочетается с сохранением их подвижности при скоплении у барьеров, что предотвращает хрупкое разрушение. [7]

При соответствующем составе матричных сплавов и определённой объемной доле армирования дисперсно-упрочнённые КМ системы Al–SiC (КМ с матрицей из алюминиевых сплавов, армированных частицами кар-

бида кремния), обладают низкими значениями коэффициентов трения и дают весьма высокие результаты по износостойкости. [8] Кроме того, дисперсно-упрочненные КМ имеют хорошие литейные свойства и возможность пластической и механической обработки. Важными достоинствами дисперсно-упрочнённых КМ на базе легких алюминиевых сплавов являются их малый удельный вес и относительно низкая стоимость. [9]

В результате выполнения данной работы были изучены свойства дюралюминия Д16 и дисперсно-упрочненного композиционного материала Ал25 + 14% SiC. Дисперсность частиц карбида кремния в этом сплаве составляет 14 мкм.

Исследования были проведены на установке по изучению трения волокно-металл [10, 11].

В качестве волокнистого материала были выбраны лавсановые нити марки 35ЛЛ. Это армированные нити с полиэфирной оплеткой, состоящие на 100% из лавсана. Выбор именно этих нитей был обусловлен тем, что лавсановые нити имеют высокую прочность и износостойкость, что исключительно важно для проведения данных исследований.

В ходе исследований на установке было сделано по 10 заходов нити для каждого образца. Длина намотки нити за один заход – 2500 м. Т.е. суммарная длина нити равна 25000 м.

При трении волокнистого материала регистрировалось отклонение маятникового прибора на угол α, посредством которого вычислялся момент трения и натяжение нити.

Момент трения, возникающий в системе при прохождении нити через нитепроводник, можно вычислить по формулам:

$$M_{тр} = mgl_{Г} \sin\alpha \qquad (1.1)$$

$$M_{тр} = (F_{тр} - F_{Н}) l_{М} \cos\alpha \qquad (1.2)$$

где $F_{тр} = fN$ (1.3)

Приравняем (1.1) и (1.2), выразим $F_{тр}$:

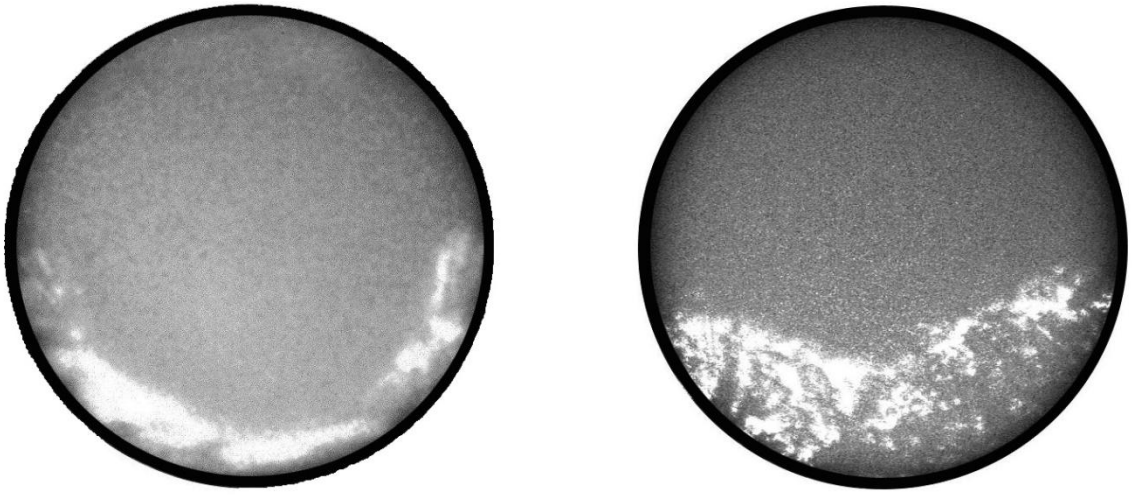
$$F_{тр} = mg \frac{l_{Г}}{l_{М}} tg\alpha + F_{Н} \qquad (1.4)$$

Подставим (1.3) в (1.4) и выразим коэффициент трения:

$$f = \frac{mg \frac{l_{Г}}{l_{М}} tg\alpha + F_{Н}}{N} \qquad (1.5)$$

Используя это выражение, находим коэффициент трения. Из коэффициент трения лавсановой нити по дюралюминиевому нитепроводнику оказался равен $f = 0.47$

После проведения испытаний металлические пластины были изучены на металлографическом микроскопе МИМ-7. С помощью микроскопа были определены глубина и ширина лунки износа. Также были сделаны фотографии лунок износа при 100 кратном увеличении. Фотографии лунок износа представлены на рис. 1.



а) х100 б) х100

Рис. 1. Лунки износа дюралюминия Д16 (а) и сплава Ал25 + 14% SiC (б)

Изображения рельефа изношенной поверхности композиционного материала Ал25 + 14% SiC и дюралюминия Д16 были получены на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47-PRO фирмы NT-MDT.

Для анализа износа, возникающего при трении волокнистой нити о образец материала, наиболее характерен снимок поверхности дюралюминия Д16 представленный на рис. 2.

Наиболее ярко выраженными оказались адгезионный и абразивный износ, а также адгезионное схватывание. Размеры очага адгезионного схватывания имеют диаметр 0.3-0.6 мкм, а ширина канавок абразивного износа колеблется в пределах от 0.3 мкм до 0.9 мкм.

На рис. 2 хорошо видны множественные канавки и царапины, что свидетельствует о абразивном характере износа. Этот тип износа возникает при скольжении острых частиц по металлической поверхности с различной скоростью. Износ происходит посредством стачивания металла частицами, которые подобны маленьким режущим инструментам. Чем тяжелее частица и более острая у нее форма, тем серьезнее истирание. Вероятно в волокнистом материале имеются мелкие частицы абразива, которые и вызывают данный тип изнашивания.

Таблица 1. Расчетные данные по износу опытных образцов

	Д16	Ал25 + 14% SiC
Ширина лунки износа, мм	0.0372	0.0192
Глубина лунки износа, мм	0.0168	0.0060
Толщина пластины, мм	1.05	1.05
Объем изношенного материала, мм^3	0.0404	0.0069
Объемный износ материала, м^3/м	$1{,}616 \cdot 10^{-9}$	$2{,}76 \cdot 10^{-10}$
Линейный износ материала, мм/км	$6.44 \cdot 10^{-9}$	$2.3 \cdot 10^{-9}$

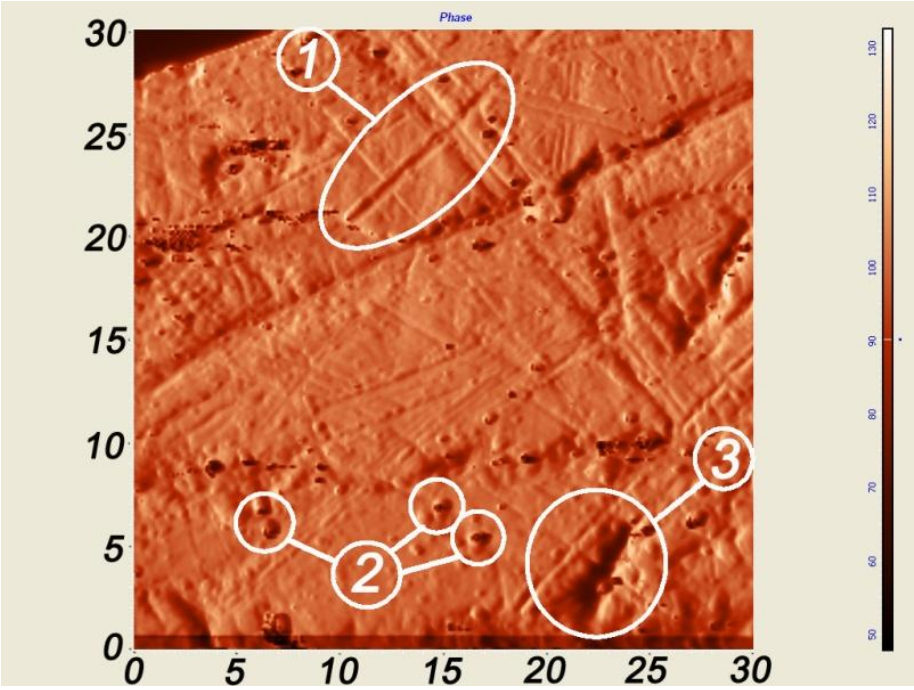


Рис. 2. Рельеф лунки износа дюралюминия Д16 и наиболее характерные виды износа (1 – абразивный износ, 2 – адгезионное схватывание, 3 – адгезия)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пирогов К.М., Егоров С.А. Основы надежности текстильных машин: Учебное пособие для вузов. – Иваново: ИГТА, 2004. – 268 с.
2. Крагельский И.В. Трение и износ в машинах. – М.: Машгиз, 1962. – 384 с.
3. Егоров С.А. Взаимодействие текстильного волокнистого продукта с рабочими органами текстильных машин. –Иваново: ИГТА, 2005. – 152 с.
4. Гуляев Е.С., Прокопенко А.К. Возможные решения проблемы износа деталей механических систем и исполнительных органов оборудования текстильного производства // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012. №1 с. 108-111
5. Малафеев Р.М., Григорьев К.А., Фомин Б.М. Механика износа рабочих поверхностей кулака привода зевообразовательного механизма круглой ткацкой машины ТКП-110У // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011. №1 С. 101-106
6. Курганова Ю.А., Чернышова Т.А. Разработка и применение дисперсноупрочненных алюмоматричных композиционных материалов. Ульяновск: Из-во «Венец», 2010. 223 с.
7. Исследование трибологических характеристик алюмоматричных композиционных материалов, полученных реакционным литьем / А.А. Панфилов, А.В. Панфилов, Ал.А. Панфилов, Т.А. Чернышова, Л.К. Кобелева, Л.К. Болотова // Новые материалы и технологии в машиностроении. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Выпуск 5. - Брянск: БГТИА, 2006. С 125-128.
8. Курганова Ю.А. Дисперсноупрочненные композиционные материалы в условиях трения. Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 188 с.
9. Семенов Б.И. Освоение композитов – путь к новому уровню качества материалов // Литейное производство. 2000. № 8. С. 6–11.
10. Егоров С.А. Повышение износостойкости деталей прядильного оборудования электроэрозионным упрочнением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. – № 11. С. 53 – 56.
11. Егоров С.А., Ведерникова И.И., Мутовкин И.Ф. Повышение долговечности прядильных камер пневмомеханических прядильных машин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12. – С. 39 – 42.
12. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Российская академия наук, Институт физики микроструктур г. Нижний Новгород, 2004. - 110 с.

УДК 681.7.022.2:65.011.56

Е. И. Яблочников, А. В. Пирогов, С. Д. Васильков,
А. С. Восоркин, А. А. Кушнаренко

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТЬЕВЫХ ФОРМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПИЛОТНЫХ СЕРИЙ ДЕТАЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Евгений Иванович Яблочников, к.т.н., доцент, зав. каф. ТПС
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 9219476312, E-mail: eugeny@beepitron.com



Александр Владимирович Пирогов, аспирант кафедры ТПС
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7931 2518833, E-mail: avpir@mail.ru



Сергей Дмитриевич Васильков, к.т.н., доцент кафедры ТПС
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 952 3720530, E-mail: vasilkov@niuitmo.ru



Алексей Сергеевич Восоркин, аспирант кафедры ТПС
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 921 1857966, E-mail: asvosorkin@gmail.com



Анастасия Александровна Кушнаренко, магистрант едры ТПС
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 951 6642246, E-mail: leony.th@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы проектирования и производства оптических изделий из термопластичных полимерных материалов. Описаны проблемы классификации и группирования изделий, анализа

моделирования процессов литья изделий, выбора термопластавтоматов. Представлены принципы проектирования литьевых форм, основанные на использовании каталогов стандартных деталей и комплектов сменных формообразующих деталей.

Ключевые слова: термопластичные полимерные материалы, термопластавтомат, полимерные оптические изделия, системы инженерного анализа, литьевая форма, CAD/CAM/CAE, групповая технология.

E. I. Yablochnikov, A. V. Pirogov, S. D. Vasilkov, A. S. Vosorkin,
A. A. Kushnarenko

DESIGN PRINCIPLES OF INJECTION MOLDS FOR EXPERIMENTAL SERIES OF OPTICAL PARTS OF THERMOPLASTIC POLYMERIC MATERIALS

Dr. Eugeny I. Yablochnikov[1], e-mail: eugeny@beepitron.com;
Alexander V. Pirogov[1], e-mail: avpir@mail.ru;
Dr. Sergey D. Vasilkov[1], e-mail: vasilkov@niuitmo.ru;
Alexey S. Vosorkin[1], e-mail: asvosorkin@gmail.com;
Anastasia A Kushnarenko[1], e-mail: leony.th@gmail.com.
[1]St.Petersburg National research university of information technologies, mechanics and optics, St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper deals with the design and manufacturing of optical products from thermoplastic polymeric materials. Describes the classification and grouping of products, analysis, simulation of molding, injection molding machine of choice. The principles of the design of injection molds based on the use of standard parts catalogs and of a set of replacement parts forming.

Keywords: Thermoplastic polymeric materials, injection molding machine, plastic optical products, systems engineering analysis, molds, CAD/CAM/CAE, group technology.

Производство деталей оптического назначения из полимерных материалов требует решения взаимосвязанного комплекса задач на стадиях проектирования изделий и разработки технологии их изготовления. Применение систем прототипирования, инженерного анализа и автоматизированного проектирования сложной формообразующей оснастки позволяет обеспечить требуемое качество и достоверность принимаемых решений.

Существует несколько технологий изготовления полимерных оптических изделий, которые применяются в зависимости от

необходимого размера серии, а также требуемых параметров геометрической точности и качества поверхностей.

Для изготовления единичных опытных образцов эффективно использовать оборудование для быстрого прототипирования с дальнейшей полировкой поверхности изделия. Применение специального прозрачного материала позволяет не только создать на 3D-принтере единичные модели для отработки их конструкции, эргономики, собираемости, но и создавать детали класса «неизображающей» оптики.

Для малой серии изделий (20-50 штук) целесообразно использовать литье в силиконовые формы, при создании которыхиспользуются мастер-модели, полученные на 3D-принтере. Затем в такую форму под вакуумом отливаются детали из двухкомпонентных полиуретанов. Этот метод также не обеспечивает высоких точностных характеристик, но позволяет быстро получить небольшую партию изделий. Наличие прозрачных полиуретанов делает этот метод доступным для изготовления оптических деталей.

При увеличении необходимого количества изделий, последний способ становится неэффективным из-за высоких затрат на создание силиконовых форм, поэтому логично перейти к использованию термопластавтоматов (ТПА), что требует проектирования и изготовления литьевых форм [1]. ТПА используются, как правило, для изготовления крупных серий изделий, однако, подход, основанный на применении методов групповой технологии [2], позволяет использовать преимущества оборудования, применяемого в крупносерийном производстве для условий изготовления небольших серий изделий. В этом случае требуется разработка переналаживаемых литьевых форм со сменными вставками (формообразующими деталями – ФОД). При разработке таких специализированных переналаживаемых литьевых форм используются методы автоматизированного проектирования и инженерного анализа для предварительного выявления и устранения зон повышенных остаточных напряжений, зон коробления и непроливаемых областей. Построение технологической цепочки проектирования и подготовки производства изделий, начиная от оптимизации изделия, проверки его на технологичность и заканчивая экономически эффективным выпуском малых серий, позволяет перейти к изготовлению, так называемых, «пилотных серий», выпускаемых на стадии опытно-конструкторских и технологических работ.

Формирование групп деталей выполняется на основе анализа конструктивных и технологических параметров. К основным конструктивным параметрам детали могут быть отнесены следующие:

- габаритные размеры;
- объем изделия;
- толщина стенок;
- точность размеров и требования к качеству поверхностей.

При группировании деталей, изготавливаемых из полимерных материалов, также необходимо учитывать конструктивные особенности литьевой формы, а именно: линии разъема, расположение и способ выталкивания готовой детали, расположение выталкивателей в форме, конструкции литниковой системы и системы охлаждения, а также наличие в изделии элементов, формуемых шиберными вставками [2].

Описание сформированной группы деталей с учетом выше указанных признаков применяется для выбора подходящего ТПА. Выбор ТПА – сложная задача со многими неизвестными. ТПА является универсальным оборудованием для изготовления изделий из различных полимерных материалов – от корпусов приборов до линз. При правильном выборе типа, модификации, габаритов ТПА и учете большого набора технологических параметров, определяющих процесс литья можно добиться эффективных стоимостных результатов и заданных показателей качества продукции [3].

На основе ранее проведенного анализа признаков классификации и группирования деталей, можно выделить ряд ключевыхпараметров, которые необходимо учитывать при выборе ТПА:

- размер конечной детали при определении максимального объема впрыска;
- показатель усилия смыкания формы;
- габариты формы и расстояния между колоннами.

Кроме того, для литья деталей оптического назначения целесообразно использовать электрический ТПА в виду того, что в отличие от гидравлического он обеспечивает более высокую точность при литье небольших по размерам изделий. При использовании электрических ТПА не образуются масляные пары, а значит, появляется возможность применения «чистых комнат». Также электрические приводы точнее позиционируются. Скорость впрыска расплава материала значительно выше, чем на гидравлическом ТПА [4], вследствие чего сокращается время сухого цикла, а значит, появляется возможность производства тонкостенных изделий с короткими циклами.

При производстве оптических изделий наряду с их конструктивными особенностями в центре внимания всегда находится материал, который подвергается температурной и механической нагрузкам в литьевой форме по определенной технологии с заданной точностью изготовления оптического изделия [5]. Главным подходом для обеспечения высокой точности изготовления изделий, является применение систем компьютерного автоматизированного проектирования. В этом случае становится возможным применение сложных трехмерных моделей изделий на всех этапах проектирования и технологической подготовки производства. При этом работы носят итерационный характер, и должны проводиться в тесном контакте технологов, специалистов по расчету оптики и конструкторов [6].

Кратко рассмотрим применение систем инженерного анализа при отработке базовых решений при проектировании литьевых форм. Поведение полимерных материалов в жидком состоянии имеет сложный характер, поэтому необходимо иметь возможность предсказывать и анализировать потоки расплавов, которые возникают в процессе литья под давлением. Применяемые в CAE-системах математические модели с достаточной точностью описывают процессы, происходящие во время литья под давлением [7].

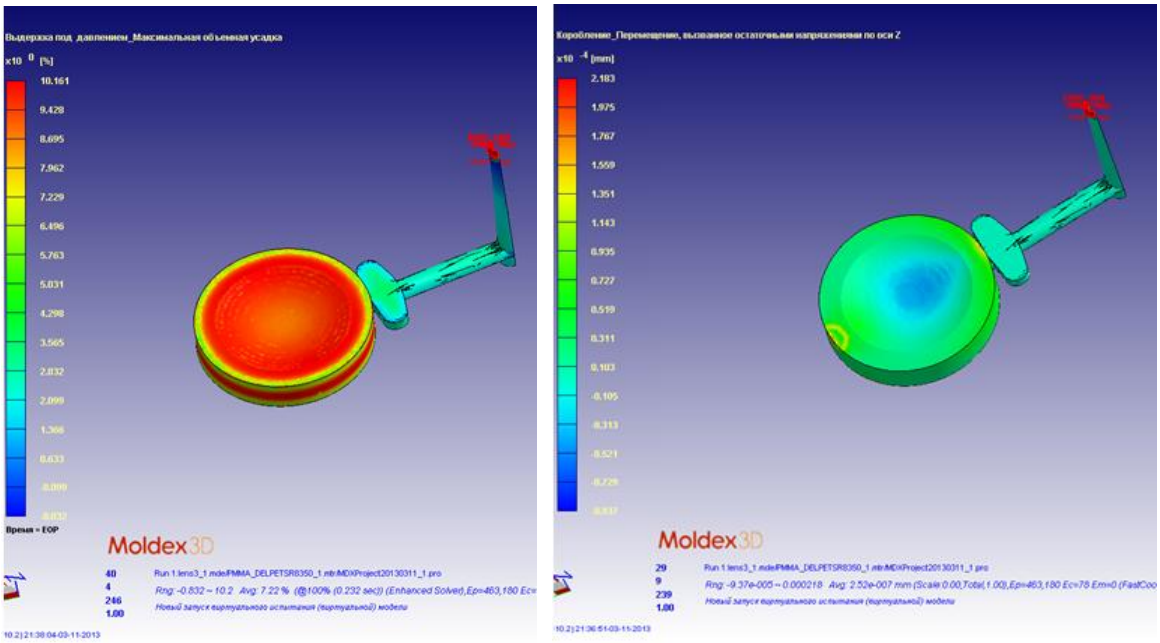
Таким образом, можно получить информацию о поведении материала на этапах процесса литья под давлением на ТПА (заполнение литьевой формы, выдержка под давлением, охлаждение) в виде диаграмм распределения температур, давления, наглядного представления движения потока расплава. Так, на рис. 1, а показаны результаты инженерного анализа усадки материала (в процентах), проведенного в системе Moldex3D. Полученные данные необходимо использовать конструкторам и технологам для внесения изменений в конструкциилитьевой формы, ФОД или изменения режимов литья. Усадочные процессы происходят при остывании полимерного материала с частичной компенсацией объемных изменений. Таким образом, возможность регулирования усадки является одним из подходов для улучшения качества отливаемого изделия [8]. На рис. 1, б показано возникновение коробления (в миллиметрах), вызванное остаточными напряжениями, которые в свою очередь обусловлены двумя группами причин – течением полимера и градиентом температуры. Чтобы снизить остаточные напряжения, возникающие в полимерном изделии, можно прибегнуть к увеличению размера зоны впрыска, тогда скорость течения будет меньше различаться, а также будет обеспечено более равномерное охлаждение.

Таким образом, по результатам виртуального моделирования процессов литья, оценивается характер и полнота заполняемости формы, что во многом зависит от реологических свойств материала. Если при этом оказывается, что невозможно изготовить изделие из данного материала, то принимается решение о его замене, изменении технологических режимов литья или даже изменении конструкции изделия [9].

На этом же этапе проводится анализ оптических свойств «виртуальной» отливки. На основе полученных результатов можно судить об изменении коэффициента преломления, о возникновении двойного лучепреломления, об изменении остаточных напряжений. В случае ухудшения характеристик качества передаваемого изображения необходимо провести корректировку принятых ранее конструкторско-технологических решений и повторить этап инженерного анализа заново.

Получение подобной информации о влияющих факторах на процесс производства изделий, позволяет успешно использовать современные технологии литья, например, литье с прессованием, которое в сочетании с

применением высокоточных литьевых форм способствует повышению точности формования изделий и улучшению их оптических показателей [10, 11].



а) б)

Рис. 1. Результаты моделирования литься под давлением полимерной линзы: а – усадка материала (%), б – коробление (мм), вызванное остаточными напряжениями

На основе полученных данных выполняется следующий этап – проектирование литьевой формы. При отсутствии средств автоматизации, проектирование является достаточно длительным процессом и увеличивает сроки выполнения ТПП. Применение CAD/CAM-систем позволяет значительно сократить время проектирования и изготовления технологической оснастки [12]. Общепринятым в мировой практике является использование стандартных узлов и деталей литьевых форм, которых имеются в современных системах проектирования, например, в применяемых авторами системах Cimatron или CATIA, что значительно ускоряет процесс проектирования и сокращает затраты на собственное производство. При этом уровень автоматизации проектирования литьевых форм является достаточно высоким и можно применять конфигурации литьевых форм как «по умолчанию», так и по выбору проектировщика. Пример, созданной в системе Cimatron литьевой формы показан на рис. 2 (использована функция системы по представлению информации о литьевой форме в, так называемом, «разобранном виде»). Модель формообразующей детали приведена на рис. 3, б. В рассматриваемой литьевой форме могут быть получены полимерные линзы диаметром от

4мм до 40мм и толщинами стенки от 1,2мм до 6мм; количество гнезд в форме не более – 4х; рабочий цикл литья не более 30 сек.

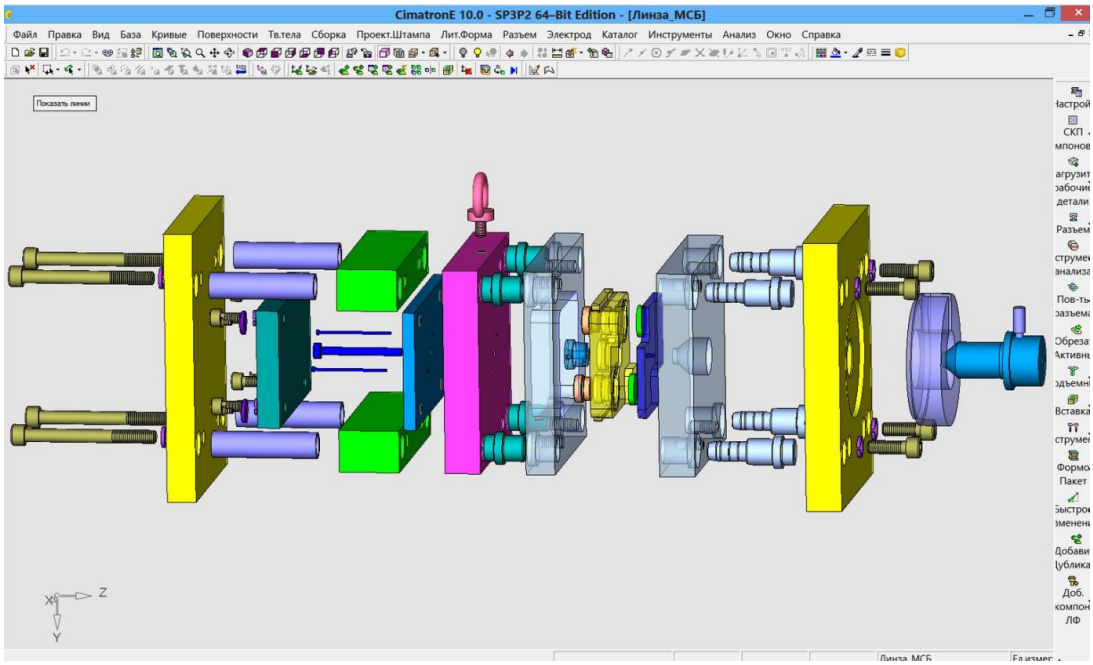
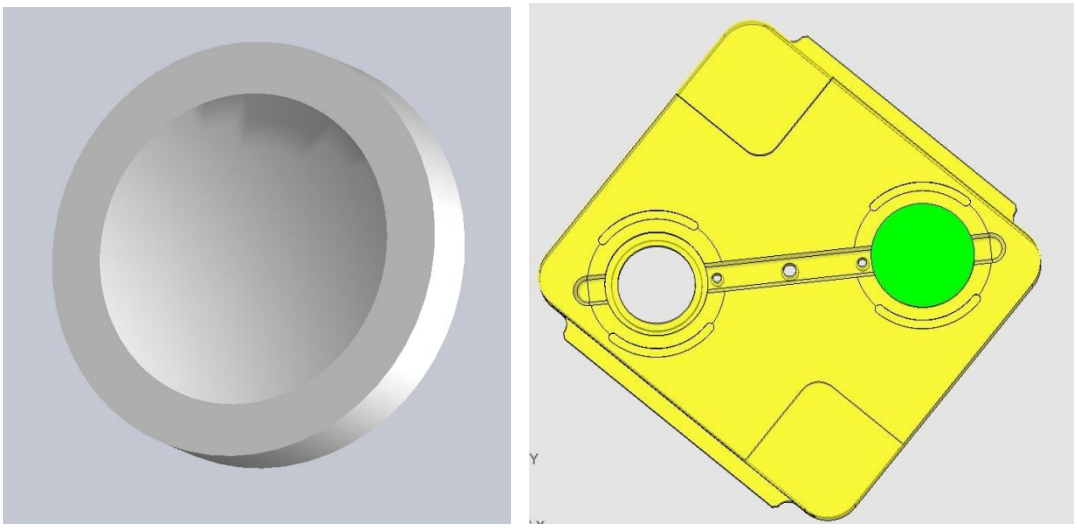


Рис. 2. Конструкция литьевой формы, спроектированной в Cimatron с использованием каталогов стандартных деталей

При использовании специализированной переналаживаемой литьевой формы изготавливаются комплекты сменных формообразующих деталей под каждую деталь группы. С учетом того, что для сборки прибора необходимо изготавливать и различные корпусные детали из различных полимерных материалов, рассмотрим более широко возможный спектр применяемых для ФОД материалов. Анализ опыта ведущих компаний, работающих в нашей стране на этом рынке, показывает, что для проверки на собираемость и оценки вставок комплект ФОД можно «выращивать» на 3D-принтере из фотополимеров (например, на принтере Objet). Если есть необходимость создать небольшую партию деталей из материалов с низкой температурой плавления, то для ФОД используется ABS-подобная фотополимерная композиция. Получают распространение установки послойного спекания полиамидных порошков (PA12), например, установка EOSINT P. Также эффективным методом для изготовления ФОД из модельных материалов является фрезерование на станках с ЧПУ. Скорость обработки модельного материала очень высокая (определяется только возможностями фрезерного станка), при этом износ и отжим инструмента при обработке весьма незначительны. При эксплуатации таких ФОД можно изготовить уже несколько сотен отливок. Также можно изготавливать комплект ФОД из алюминиевых сплавов.



а) б)

Рис. 3. Модель линзы и формообразующая деталь:
а – 3D модель плоско-вогнутой линзы; б – матрица переналаживаемой литьевой формы со вставкой «под линзу»

При этом трудоёмкость их изготовления в среднем увеличивается вдвое, но и количество отливаемых деталей с таким комплектом ФОД возрастает в десятки и сотни раз. Из отечественных алюминиевых сплавов для этих целей обычно применяют марки Д16Т или В95. Таким образом, существует большое количество вариантов выбора материала ФОД, что требует наличия у разработчиков литьевых форм определенных знаний и опыта. На наш взгляд, такой опыт накоплен в компании «АБ Универсал», с которой НИУ ИТМО выполняет совместные проекты.

Однако следует отметить, что неметаллические материалы, идущие на изготовление комплекта ФОД, пригодны только для последующего литья корпусных деталей приборов. Для литья оптических деталей приборов требуется, так называемая, «зеркальная» полировка рабочих поверхностей ФОД, что возможно выполнить, используя только алюминиевые сплавы или специальные марки стали.

Таким образом, на основе применения современных методов и систем компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования, современных материалов и технологического оборудования, в сочетании с эффективной организацией процессов проектирования и производства, основанных на методе групповой технологии, может быть создана конкурентная технология проектирования и производства изделий оптического назначения из термопластичных полимерных материалов. При этом значительный эффект может быть получен на стадиях научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для выпуска «пилотных серий» изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Казмер Д. О. Разработка и конструирование литьевых форм /пер. с англ. под ред. В. Г. Дувидзона – СПб.: ЦОП «Профессия», 2011.-464с.

2 Митрофанов С. П. Групповая технология изготовления заготовок серийного производства.- Л.: Машиностроение, Ленингр.отд-ние, 1985.-240с.

3 Термопластавтомат. Выбор ТПА по параметрам. [Электронный ресурс] URL: http://e-plastic.ru/main/articles/r4/pl07

4 Электрические ТПА. [Электронный ресурс] URL: http://promlitie.ru/index.php?r=35&sid=694

5 Серова В.Н. Полимерные оптические материалы. – СПб.: Научные основы и технологии,2011.-384с.

6 Пирогов А. В. Применение инновационных технологий при проектировании и технологической подготовке производства изделий из полимерных материалов. – Материалы международной научно-технической конференции «Высокие технологии в машиностроении». – Курган. 2012. с.122-124.

7 Барвинский И. А, Барвинская И. Е. Компьютерный анализ литья: Подходы и модели // Пластикс. – М.: Пластикс, 2009, № 3, стр. 50-54; № 4. С. 63–66

8 Брагинский В. А., Барвинский И. А., Регулирование усадки при литье термопластов под давлением. - Химический журнал (The Chemical Journal), №12, 2011 - с.51-53.

9 Яблочников Е. И., Брагинский В. А., Восоркин А. С. Применение систем виртуального моделирования при выборе и проектировании полимерных композиционных материалов. – «Известия высших учебных заведения – Приборостроение», № 7, 2012. – с.75–80.

10 Тинель П., Люк А., Тальхов М. Игра со светом // Полимерные материалы. – М. 2011. № 9.

11 Stricker M., Pillwein G., Giessauf J. PraezisionimFokus // Kunstoffe. № 99, 200, p30-34.

12 Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочников Е. И. Информационные технологии в проектировании и производстве. – СПб: Политехника, 2008. – 304с.

КАЧЕСТВО И ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 334.764.44

С.Ю. Грибов

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ХОЛДИНГЕ



Сергей Юрьевич Грибов, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (921) 425-6476, e-mail: s_gribov@inbox.ru

Аннотация.

В работе рассмотрены способы расчета синергетического эффекта в холдинге в зависимости от наличия подразделений с рыночными и нерыночными функциями, а также текущего состояния подразделений холдинга: централизованного, децентрализованного или комбинированного вида. По результатам расчетов даны рекомендации по сохранению синергетического эффекта, приведены примеры организационных изменений структуры управления.

Ключевые слова: синергетический эффект, инвестиции, доходность инвестированного капитала, организационная структура.

S.Y. Gribov

FEATURES OF CALCULATION OF SYNERGETIC EFFECT IN THE HOLDING

Sergey Y. Gribov, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia
E-mail: s_gribov@inbox.ru

Abstract

Features of calculation of synergetic effect in the holding Abstract The article is devoted to calculation synergetic effect in holding in dependence off availability of divisions with market and not market functions, as well as a current status of holding units: the centralized, decentralized or combined type. By results of calculations recommendations on conservation synergetic effect are given, examples of organizational variations of structure of management are resulted.

Key words: synergetic effect, investments, profitableness of the invested capital, organizational structure.

Многие современные машиностроительные организации имеют сложную холдинговую структуру. Холдинги имеют огромное значение в экономике западных стран и приобретают все большее значение для экономики России. Процесс создания холдингов в нашей стране связан со структурной перестройкой экономики и широкомасштабной приватизацией государственных предприятий. Однако в силу того, что холдинги довольно молодое явление в отечественной экономике, их правовой статус, процесс создания и функционирования до сих пор четко не определены. Внутри холдингов с недостаточно жесткой системой управления довольно часто подразделения частично или полностью дублируют друг друга, иногда даже конкурируя между собой.

Эффективность холдингов достигается за счет дополнительных возможностей, которые предоставляются их собственникам [5]. Для эффективного управления, руководству холдинга необходимо понимание принципов достижения и сохранения эффекта синергии. Под синергетическим эффектом понимается согласованное, взаимно усиливающееся действие двух и более подсистем, в результате объединения которых объединенная система производит больший эффект, нежели простая сумма входящих подсистем. Математически это может быть выражено как 2+2=5.

Следует выделять следующие виды синергии [7]:

- **операционная синергия**, как экономия за счет увеличения масштаба деятельности. Возникает в случае, если участники интеграции создают единые центры управления, единую инфраструктуру, тем самым снижая постоянные расходы на единицу продукции. При горизонтальной интеграции экономия происходит за счет устранения дублирующих функций и роста производительности труда;

- **финансовая синергия** может достигаться за счет роста стоимости организации после объединения на основе оптимистических ожиданий игроков рынка, использования налоговых льгот, снижения налоговой базы объединенной организации, увеличения размеров обеспечения займов, экономии на масштабах деятельности, диверсификации бизнеса, повышения конкурентоспособности;

- **инвестиционная синергия** образуется за счет повышения привлекательности объединенной организации с точки зрения потенциального инвестора, а также за счет повышения загрузки имеющихся и высвобождения дублирующих активов с их последующей реализацией;

- **функциональная синергия** достигается в случае изменения в организационной структуре бизнеса, функциональной реструктуризации, перераспределения центров ответственности и прибыли;

- **маркетинговая синергия** это увеличение рыночной доли организации, устранение внутренней конкуренции, оптимизация логистических цепей и ценообразования, расширения ассортиментных групп, быстрый выход на рынки с новым товаром, повышение имиджа организации;

- **управленческая синергия** снижение затрат на управление, увеличение политического влияния, совершенствование корпоративной стратегии;

- **инновационная синергия** снижение затрат, повышение потенциала, финансирование новых НИОКР, широкое внедрение ноу-хау.

Совместное использование бренда, товарного знака корпоративного центра или дочерней организации может способствовать значительному продвижению имеющейся или новой продукции для захвата большей доли рынка.

Современные разработки в области управления синергией позволяют оценивать синергетический эффект при слиянии и присоединении, разделении и выделении организаций. Применение этих разработок на практике в действующих интегрированных структурах, описание расчетов, управленческие меры по реорганизации оргструктуры и мотивации для сохранения синергетического эффекта слабо изучены.

Руководители холдинговых структур все чаще приходят к пониманию необходимости определения синергетического эффекта уже действующих подразделений. Причинами этого могут быть их убыточное состояние, недостаточная управляемость др.

Понимание составляющих синергии важно в условиях принятия решений, возникающих при создании проектов новой техники, развития машиностроительных холдингов, приобретения оборудования и технологий [8].

В качестве объекта исследования был выбран горизонтально интегрированный холдинг с линейно-функциональной структурой управления. Холдинг включает в себя материнскую организацию (корпоративный центр), а также ряд дочерних организаций, осуществляющих производственные виды деятельности. Корпоративный центр осуществляет свой вид бизнеса и оказывает сервисные услуги дочерним организациям.

Исследования проводились по ряду сервисных служб корпоративного центра и дочерних организаций, а именно: снабжения, складского хозяйства, охраны, экологии, охраны труда и техники безопасности, метрологического контроля, входного контроля, клининговому, транспортному.

В результате дублирования функций перечисленных подразделений в корпоративном центре и дочерних организациях значительные текущие и инвестиционные затраты холдинга направлялись на одни и те же цели. В связи с разной спецификой расчета синергетического эффекта подразделения разделяют на подразделения с рыночными и нерыночными функциями.

Подразделения с рыночными функциями - это структурные подразделения, которые имеют рыночные аналоги (могут оказывать услуги подразделениям, дочерним организациям холдинга, или другим юридическим лицам)

Подразделения с нерыночными функциями - это структурные подразделения, оказывающие услуги, востребованные только внутри холдинга, либо в соответствии с требованиями нормативных документов холдинг обязан создать такое подразделение.

Некоторые подразделения, созданные в соответствии с требованиями нормативных документов (например, бюро техники безопасности), при наличии аккредитации могут оказывать услуги по аттестации рабочих мест. Затраты и доходы таких подразделений должны быть разделены и при расчете синергетического эффекта учитываться дифференцированно.

Расчет синергетического эффекта по сервисным подразделениям холдинга с рыночными и нерыночными функциями

	Централизованные	Децентрализованные	Комбинированные
Подразделения с рыночными функциями	$S = З + d - З_а$ $d = I \times k$	$S = З - \sum_{i=1}^{n} З_{дi} + I - \sum_{i=1}^{n} I_{дi} + В - \sum_{i=1}^{n} В_{дi}$	$S = \sum_{i=1}^{n}(З_{кi} - З_{дi}) + \sum_{i=1}^{n}(I_{кi} - I_{дi}) + \sum_{i=1}^{n}(В_{кi} - В_{дi})$ $S = \sum_{i=1}^{n} З_{кi} - З + \sum_{i=1}^{n} I_{кi} - I + \sum_{i=1}^{n} В_{кi} - В$
Подразделения с нерыночными функциями	$S = \sum_{i=1}^{n} З_{дi} - З + \sum_{i=1}^{n} I_{дi} - I$	$S = З - \sum_{i=1}^{n} З_{дi} + I - \sum_{i=1}^{n} I_{дi}$	$S = \sum_{i=1}^{n}(З_{кi} - З_{дi}) + \sum_{i=1}^{n}(I_{кi} - I_{дi})$ $S = \sum_{i=1}^{n} З_{кi} - З + \sum_{i=1}^{n} I_{кi} - I$

где S - сумма синергетического эффекта, руб.;

i- количество подразделений, которые оказывают или используют аналогичные услуги, шт.;

З; $З_{дi}$; $З_{кi}$- текущие затраты централизованного, децентрализованных и комбинированных подразделений холдинга, руб/год;

$З_а$ - затраты на приобретение аналогичных услуг при передаче их на аутсорсинг, руб/год;

I; $I_{дi}$; $I_{кi}$–инвестированный капитал, вложенный в централизованное, децентрализованные и комбинированные подразделения, руб;

d - рентабельность инвестированного капитала, руб;

k- средняя отраслевая рентабельность инвестированного капитала аналогичной рыночной функции,%;

B; $B_{дi}$;$B_{кi}$- выручка централизованного, децентрализованных и комбинированных подразделений холдинга, руб/год без НДС.

Показатели таблицы характеризуют расчет синергетического эффекта в зависимости от наличия подразделений с рыночными и нерыночными функциями, а также исходного состояния, в котором находятся подразделения холдинга: централизованного, децентрализованного или комбинированного.

Централизованное состояние означает, что в корпоративном центре или одной из дочерних организаций создано подразделение, функции которого не дублируются.

Основной подход к расчету синергии по централизованным нерыночным подразделениям заключается в сопоставлении инвестиционных затрат на создание аналогичных подразделений в каждой организации–потребителе этой услуги и годовых текущих затрат на их содержание с затратами и инвестициями, вложенными в централизованное подразделение.

Главным условием расчета синергии централизованного подразделения с рыночными функциями является сравнение с рыночными аналогами. Если стоимость аналогичных услуг (с учетом доставки и др. расходов) на рынке ниже суммы текущих затрат и заданной акционерами суммы рентабельности инвестированного капитала, синергетический эффект отрицателен и целесообразно отказаться от содержания такого подразделения.

Децентрализованное состояние подразумевает, что в корпоративном центре и каждой из дочерних организаций созданы подразделения, функции которых дублируются. Наличие таких подразделений позволяют дочерним организациям и корпоративному центру быть полностью независимыми друг от друга.

Основой подхода к расчету синергии по децентрализованным нерыночным подразделениям является сопоставление инвестиционных затрат на создание централизованного подразделения и годовых текущих затрат на его содержание с суммой текущих и инвестиционных затрат децентрализованных подразделений.

Расчет синергии децентрализованных и комбинированных подразделений с рыночными функциями является промежуточным. Если синергетический эффект отрицательный, целесообразно создание централизованного подразделения, а если положительный- децентрализованного. Вторым этапом осуществляется сравнение затрат централизованного подразделения с рыночными функциями и стоимостью аналогичных услуг в случае их передачи на аутсорсинг.

Комбинированный тип допускает, что подразделения дочерних организаций приобретают часть услуг подразделения (например, у сервисных служб корпоративного центра), а часть самостоятельно. Примером может служить приобретение дочерней организацией металла и у прямого поставщика и у службы снабжения корпоративного центра. По итогам сравнения подразделения комбинированного типа с централизованным и децентрализованным вариантами, синергетический эффект может быть одинаков. В этом случае решение о централизации или децентрализации может быть принято с учетом дополнительных факторов, например, времени поставки, норм отгрузки и т.д.

Расчет синергетического эффекта сервисных служб с нерыночными функциями отличается от рыночных отсутствием доходности инвестированного капитала, возможностей для увеличения выручки и сравнения с рыночными аналогами.

Используя данные управленческого учета и предложенную методику расчета, можно достоверно рассчитать все виды синергии, описанные выше и которые присущи внутренним сервисным подразделениям холдинга.

Немаловажным было бы отметить, что зачастую дочерние организации, особенно находящиеся не в самом лучшем финансовом состоянии склонны нарушать требования технической документации, пренебрегать правилами техники безопасности, таким образом искусственно снижая свои затраты и искажая синергетический эффект [4]. Одной из важнейших причин отсутствия синергии при объединении может стать отсутствие заинтересованности объединенной организации в снижении затрат [9].

В докладе систематизированы расчеты эффекта синергии по подразделениям холдинга с рыночными и нерыночными функциями. В зависимости от величины синергетического эффекта руководством интегрированной структуры могут быть приняты решения не только о централизации или децентрализации функций, передаче их на аутсорсинг, изменении политики организации в части ценообразования и инвестирования.

По итогам расчетов синергетического эффекта необходимо внести изменения в систему организационно-экономического управления холдинга (ликвидация, объединение подразделений, децентрализация и т.д.)

Синергия непосредственно связана со стратегией развития организации, принципы формирования синергии и меры по ее сохранению должны быть закреплены за «Синергетическим советом», который непосредственно подчиняется только Совету директоров. Целью «Синергетического совета» является достижение быстрых результатов от внедрения инновационных предложений [6]. Руководству холдинга необходимо создать систему мотивации дочерних организаций и корпоративного центра, направленную на, как минимум, сохранение синергии в холдинге. При достаточном уровне контроля и системе мотивации синергетический эффект может быть реализован как в корпоративном центре, так и в дочерней организа-

ции. С точки зрения холдинга в целом, это не имеет значения, поскольку суммарный финансовый результат работы холдинга от этого не меняется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коупленд Т., Киллер Т., Муррин Дж. Стоимость компаний: оценка и управление.-М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2005. — 576 с.
2. Черезов А.В., Рубинштейн Т.Б. Корпорации. Корпоративное управление.- М.: ЗАО «Издательство»Экономика», 2006. -478 с.
3. Каплан Р.С., Нортон Д.П. Стратегическое единство: создание синергии организации с помощью сбалансированной системы показателей: пер. с англ.- М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006.- 384 с.
4. Пригожин А.И. Дезорганизация: Причины, виды, преодоление.- М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. -402 с.
5. В. А. Дуболазов, И. Н. Приходько. Правовые и организационно-экономические проблемы реорганизации юридических лиц // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2008.— №2(54).— С.225-229.
6. С. А. Молчаненко. Синергия вспомогательных сервисных служб совместного предприятия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки.- 2008 .— №4(61).— С. 149-154.
7. Н. Б. Хасаншина. Экономические цели и мотивы корпоративной интеграции // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. Серия 5: научно-теоретический журнал.— 2010 .— Вып.2 .— С. 100-108.
8. Л.Б. Аксенов. Современная методология проектирования в машиностроении [Электронный ресурс] // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы Международной научно-практической конференции. 2011. URL:
9. http://www.mmf.spbstu.ru/konf_2011/01.pdf
10. А. А. Баврин, В. А. Дуболазов. Создание холдинга и распределение в нем затрат, связанных с управлением// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки.— 2012 .— № 1 (139) .— С. 139-142.
11. И. А. Алтушкин. Использование возможностей синергии для устойчивого развития вертикально-интегрированных структур// Цветные металлы: ежемесячный научно-технический и производственный журнал.— 2013.— № 2 .— С. 13-17.

УДК 334.012.61

А.М. Ефимов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЫНОЧНОЙ СИЛЫ УЧАСТНИКА КАНАЛА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКЦИИ



Алексей Михайлович Ефимов, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-74-82, E-mail: a.efimov@spbstu.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы определения рыночной силы участников канала распределения. Результаты показали, что наиболее целесообразным для определения рыночной силы организации видится использование показателя относительных продаж при общей зависимости рыночной силы в виде гиперболического тангенса или S-образной кривой.

Ключевые слова: канал распределения участников, рыночная сила, объем продаж

A.M. Efimov

DETERMINATION OF DISTRIBUTION CHANNEL MEMBER MARKET POWER

Aleksei M. Efimov, St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
e-mail: a.efimov@spbstu.ru

Abstract

The article is devoted to determination of the distribution channel member market power. The results show that the most appropriate factor for determining organizations market power is a total dependence of market power in the form of a hyperbolic tangent or S-shaped curve.

Key words: distribution channel participants, market power, sales

Деятельность коммерческих юридических лиц предполагает извлечение прибыли и ее распределение между участниками. Следовательно, основной целью функционирования коммерческого предприятия является максимизация прибыли путем продажи товаров,

выполнения работ или оказания услуг. При этом цель максимизации прибыли достигается путем эффективной оптимизации всех процессов на предприятии, в том числе совершенствование системы распределения.

Для того чтобы товары (услуги) стали доступны различным потребителям, необходимо обеспечить удобство времени, места и способа приобретения этих товаров. Решением этих вопросов занимается канал распределения. Канал распределения представляет собой совокупность независимых юридических и физических лиц, которые принимают на себя или помогают передать другому право собственности на конкретный товар или услугу на пути от производителя к потребителю. Современный этап развития маркетинга даже можно назвать маркетингом распределения.

С точки зрения значимости решений в области распределения можно утверждать, что часто задел повышения эффективности проекта оптимизации формирования и управления канала распределения является весьма значительным, так как операционные затраты и затраты на товародвижение продукции существенно выше себестоимости ее производства. Так при формировании розничной цены рыбных снеков в Российской Федерации эти затраты в 1,8 раз превышают величину себестоимости этой продукции (рис. 1).



Рис. 1. Структура розничной цены рыбных снеков в Российской Федерации, %

Состав и структура канала формируется при его организации и их изменение является весьма деликатным и потенциально опасным делом, поскольку изменение каналов влияет на отношения с участниками их существующей сети. Следовательно, вопрос организации оптимальной структуры канала распределения является одной из приоритетных задач предприятия при внедрении новых проектов.

Организации, входящие в состав маркетингового канала, очень часто действуют как независимые субъекты экономических отношений. Они самостоятельно определяют свои тактические и стратегические планы действий, которые могут ущемлять интересы прочих участников канала, даже если они не являются конкурентами друг для друга. В связи с этим, требуется координация процессов планирования и функционирования каждого участника конкретного канала распределения.

Рыночная сила участника канала распределения продукции реализуется в возможности участника канала распределения продавать продукцию, а следовательно и назначать наценку на продукцию, больше средней цены на рынке. Эта возможность достигается за счет представления некоторой востребованной в канале возможности функции канала (например, возможности реализации большого количества продукции).

Так, рыночная сила участника канала распределения товаров широкого потребления заметно влияет на возможность установления высоких относительно среднерыночных цен. Одновременно принцип справедливого распределения прибыли между участниками канала должен учитывать рыночную силу или влияние участника системы распределения. Например, в случае взаимодействия неизвестного конечному потребителю производителя с крупной торговой сетью гипермаркетов безусловно условия взаимодействия, в том числе стоимость закупки товара и условия поставки, определяются сетью гипермаркетов, что является следствием высокой заинтересованности неизвестного производителя в указанном сотрудничестве. В критическом случае цена поставки товара может обеспечивать минимальную рентабельность производства товара, одновременно с весомой рентабельностью гипермаркета.

В этом случае факторами привлекательности указанного взаимодействия производителя с сетью гипермаркетов можно назвать:

- значительное увеличение объема продаж продукции, что может позволить уменьшить бюджет маркетинга и сбыта;
- повышение уровня узнаваемости торговой марки продукции производителя;
- повышение уровня лояльности потребителей к торговой марке производителя;
- снижение удельной величины постоянных затрат при увеличении объемов продаж и производства;
- прочие.

Указанные факторы способны в дальнейшем увеличить объем продаж продукции производителя, даже если взаимодействие с данной сетью прекратится. Кроме того барьеры на вход в другую торговую сеть уже будут меньше, так как продукция уже имеет своих потребителей.

Для учета указанной разницы в привлекательности взаимодействия с конкретным контрагентом рекомендуется учитывать сравнение доли рынка участника по поставляемой ассортиментной группе со средней долей рынка. Также необходимо отметить, что на практике разница в доле рынка участника и средней в 10 раз не означает разницу в рентабельности инвестиций в 10 раз. Соответственно, необходимо ввести в рассмотрение некоторую постоянную величину, обеспечивающую при расчетах минимально-приемлемый уровень рентабельности для участника с незначительной долей рынка. Если $Д_i$ – доля рынка i-го участника канала распределения по анализируемой группе товаров, то рыночную силу или влияние i-го участника B_i можно рассчитать по формуле

$$B_i = \tanh(н + \frac{Д_i}{Д_{ср}}),$$

где $н$ – коэффициент, учитывающий степень неоднородности конкурентной среды, $н = \overline{0,1}$; $Д_{ср}$ – среднерыночная доля рынка.

Графически качественную зависимость рыночной силы от доли рынка при н=0,2 и $Д_{ср}$=0,1 можно представить визуально (рис. 2).

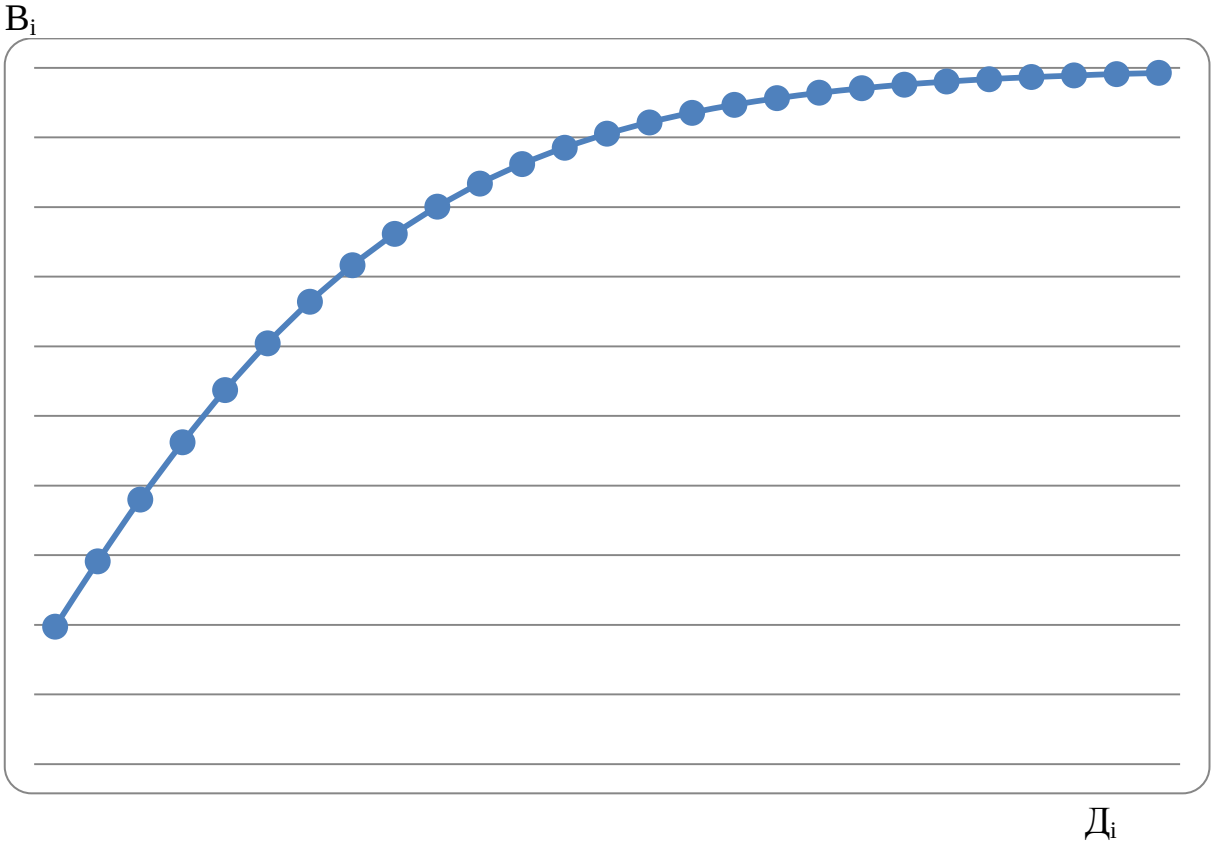


Рис. 2. Зависимость рыночной силы от доли рынка (н=0,2; $Д_{ср}$=0,1)

Выбор гиперболического тангенса в качестве аппроксимирующей функции обусловлен тем, что при больших значениях аргумента значение гиперболического тангенса асимптотически «снизу» приближается к

единице, что соответствует экономическому смыслу роста рыночной силы посредника при увеличении его доли рынка.

Поведение показателя рыночной силы можно охарактеризовать несколькими стадиями:

- при низком уровне рыночной силы небольшое отличие фактора ее определяющего у различных участников канала не вызывает заметного отличия показателя силы;
- при среднем уровне рыночной силы небольшое отличие фактора ее определяющего влечет заметное отличие показателя;
- при высоком значении рыночной силы небольшое отличие фактора ее определяющего у различных участников канала также не вызывает заметного отличия показателя силы.

Под такие признаки также попадает поведение S-образной кривой, параметры которой позволяют определить каждую из приведенных стадий.

В отдельных случаях, например, когда организация выходит на новый для себя рынок, использование показателя объема продаж на новом рынке для определения показателя рыночной силы невозможно.

Для определения изменения показателя рыночной силы от показателя качества и цены реализации продукции

$$F = \frac{p_{nk}}{q_{nk}} / \max\left(\frac{p_{nk}}{q_{nk}}\right),$$

где F – показатель рыночной силы; k – номер конкурирующего канала (1…K); q – качество продукции, баллы; p – цена продукции, руб.; n – номер участника канала на одном уровне распределения (1…N).

В этом случае рост удельной стоимости единицы качества продукции пропорционален, что не всегда является правдой. Поэтому использование S-образной кривой позволит отразить нелинейный характер изменения результирующего фактора.

$$B_i = \frac{B_0 e^{rk}}{1 + B_0(e^{rk} - 1)}; \; k = \frac{p_{nk}}{q_{nk}} / \max\left(\frac{p_{nk}}{q_{nk}}\right),$$

где B_0, r – параметры распределения рыночной силы между участниками канала распределения продукции; k = коэффициент привлекательности предлагаемого организацией продукта (k=(0…1)).

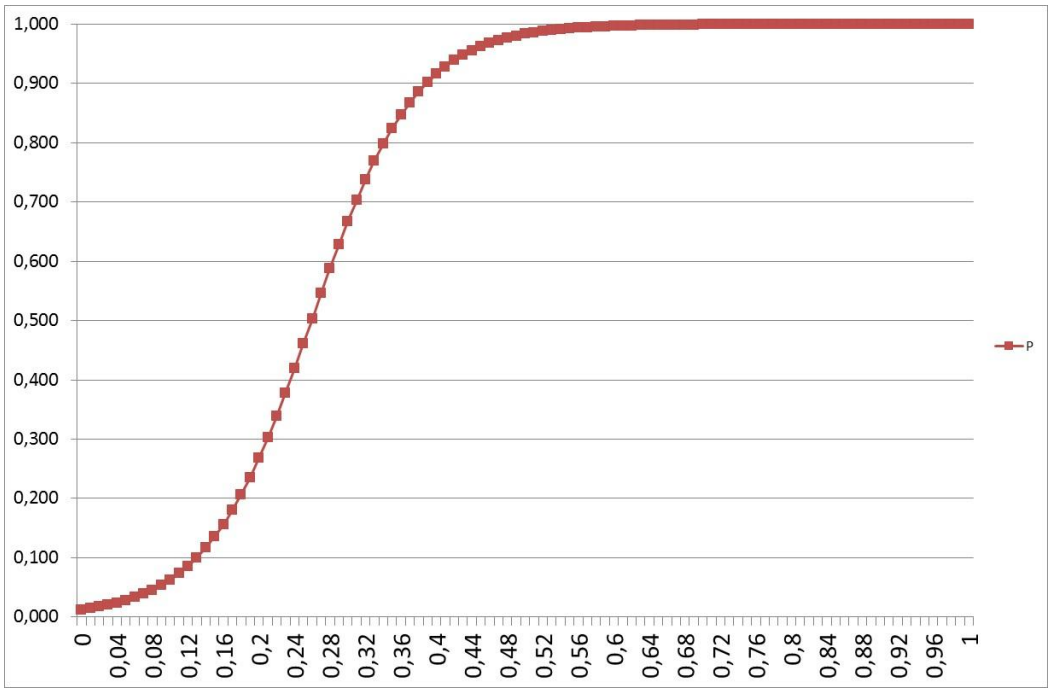


Рис. 3. Зависимость рыночной силы организации от цены и качества предложения продукции (B_0=0,5)

Таким образом, предлагаемые варианты определения рыночной силы участников канала распределения продукции позволят более точно прогнозировать показатели распределения продукции через определение возможности более точного ценообразования в канале. Распределение функций между участниками канала распределения продукции, определение цены реализации продукции на каждом уровне распределения позволят обеспечить прозрачность и обоснованность системы распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долотова Н.Л. Формирование системы управленческого учета в коммерческой организации. Научно-технические ведомости СПбГПУ Издательство: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (Санкт-Петербург). 2006. № 48-2. С.143-145.
2. Ефимов А.М. Моделирование процесса распределения прибыли между участниками канала товародвижения. // Труды 2-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экономики и новые технологии преподавания» (Смирновские чтения). Издательство МБИ. 17.02.2003.
3. Ефимов А.М. Моделирование ценообразования в канале распределения с ориентацией на справедливое распределения

прибыли между участниками канала // Управление экономическими системами: электронный научный журнал, 2011. - № 4 (28). - № гос. рег. статьи 0421100034/0102/. - Режим доступа к журн.: http://uecs.mcnip.ru.

4. Ефимов А.М. Разделение функций маркетингового канала // "Известия". Серия "Экономика и менеджмент организации".- СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", №1, 2006.
5. Климин А.И. Оценка эффективности маркетинговых коммуникаций на основе известности бренда. Научно-технические ведомости СПбГПУ Издательство: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (Санкт-Петербург). 2010. № 3. С.166-173.
6. Павлов Н.В. Параметры методов решения маркетинговых задач управления продуктом. Научно-технические ведомости СПбГПУ Издательство: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (Санкт-Петербург). 2011. № 1. С.211-217.
7. Салкуцан С.В. Планирование маркетинговых мероприятий / Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" : ежемес. журн. - 2013. - № 1. - С. 95-99.
8. Управление маркетингом в каналах распределения [Текст] / А.М. Ефимов, С.В. Салкуцан // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" : ежемес. журн. - 2008. - № 9. - С. 80-84.
9. Verhulst, P. F., (1838). Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. Correspondance mathématique et physique 10:113-121.
10. Verhulst, P. F., Recherches Mathématiques sur La Loi D'Accroissement de la Population, Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles, 18, Art. 1, 1-45, 1845 (Mathematical Researches into the Law of Population Growth Increase).

УДК 005.8

В. Е. Кузьмин

ГИБКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ



Виталий Евгеньевич Кузьмин
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)019-5378, E-mail: vitali@kouzmine.spb.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы управления проектами в условиях высокой неопределенности, когда предстоящий объем работ и требования к результату деятельности не известны на этапе планирования. Результаты исследования показали, что классические методы управления проектами, основанные на предварительном детальном планировании, в таких ситуациях не эффективны. В докладе предложено выделить такие проекты в класс эвристических и описаны разработанные для них принципы гибкого управления.

Ключевые слова: Гибкое управление проектами, эвристические проекты, итеративное планирование, самоорганизующиеся команды

V. E. Kouzmine

AGILE MANAGEMENT FOR PROJECTS WITH HIGH UNCERTANTY

Vitali Kouzmine, St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
e-mail: vitali@kouzmine.spb.ru

Abstract

The article is devoted to discussing the issues of managing projects with high uncertainty of project's goals and scope in the planning phase. The research has shown traditional project management methodologies are inefficient in such cases. In the article the author marks out such projects as heuristic and suggests agile methods principles to managing them.

Key words: agile project management, heuristic projects, iterative planning, self-organizing teams

Традиционно управление проектами начинается с составления

детального плана предстоящих работ и распределения ответственности между исполнителями. Задача руководителя при этом заключается в том, что составить такой план как можно точнее и впоследствии выполнить проект с минимальными от него отклонениями.

Однако на практике, довольно часто, в начале проекта не только неизвестен конкретный объем предстоящих работ, но и требования к результату проекта определены не до конца. Так, например, в начале разработки программного обеспечения, заказчик, как правило, не знает точных характеристик требуемого продукта и имеет лишь слабо структурированное представление о проблеме, которую требуется решить. Аналогично, при проведении научных или маркетинговых исследований, следующие шаги и даже конечная цель исследования может существенно зависеть от результатов предыдущих этапов.

Проекты с высокой степенью неопределенности в целях и составе работ не могут быть подробно спланированы до начала их выполнения. Следовательно, стандартные методы управления проектами, такие как метод сетевого планирования [2], календарного расписания [3], международный стандарт PMBOK [4] или рекомендации ГОСТ Р «Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом» [1] для таких проектов неприменимы.

Цель данной работы классифицировать проекты на поддающиеся и неподдающиеся подробному предварительному планированию, а также предложить принципы управления непланируемыми проектами, позволяющие достигать поставленных целей, даже если изначально они сформулированы нечетко.

Задача исследования: определить общие черты проектов, которые невозможно спланировать до начала их выполнения, и предложить принципы управления такими проектами.

Метод решения: анализ методологий гибкой разработки программного обеспечения («Scrum», «Extreme Programming») [6, 7] и оценка возможности их применения вне сферы разработки ПО; анализ успешных примеров управления проектами с нечеткими целями, выработка общих рекомендаций.

Классификация проектов

В своей книге «Drive: The Surprising Truth About What Motivates Us» Д. Пинк классифицирует человеческую деятельность на два типа задач – эвристические и алгоритмические [5]. Под алгоритмическими задачами он понимает такие задачи, где исполнителю требуется максимально точно выполнить заранее определенную инструкцию. Примерами таких задач могут быть покрасить стену в другой цвет, поменять колесо автомобиля, заполнить налоговую декларацию.

В эвристических же задачах, точной заранее известной инструкции не существует и от исполнителя требуется самостоятельно найти решение стоящей проблеме – нарисовать запоминающийся рекламный плакат, определить причину поломки двигателя, разработать способ минимизации налогов.

Мы считаем, что аналогичным образом можно классифицировать не только задачи, но и проекты в целом. Алгоритмические проекты можно свести к точному исполнению определенной заранее известной последовательности действий: строительство здания, монтаж новой производственной линии, составление бухгалтерской отчетности и т.д.

Эвристические же проекты направлены не на реализацию известного решения, а на его поиск. Примерами таких проектов могут являться научные исследования, разработка программного обеспечения, исследование рынка, проведение рекламной кампании или управление продуктом.

Эвристические проекты имеют два принципиальных отличия от алгоритмических:

1. Точный состав работ непредсказуем на этапе планирования. Несмотря на то, что в начале научного исследования у авторов есть примерное представление о ходе работ, точный их объем и состав определяется и многократно пересматривается уже в процесс выполнения проекта.

2. Длительность выполнения эвристических задач невозможно предсказать заранее, а, следовательно, нельзя спланировать точные сроки их выполнения. Например, решение дизайнером задачи «создать запоминающийся рекламный плакат» может занять как несколько минут, так и несколько дней. Разработка нового материала с определенными свойствами может измеряться как неделями, так и годами.

Специфика эвристических проектов затрудняет применение к ним классических методов управления проектами:

- не зная перечень задач, невозможно заранее распределить роли в команде и назначить ответственных за их решение;
- не зная длительность решения задач, невозможно заранее составить точный график работы сотрудников и согласовать их действия;
- не имея четкого плана, невозможно требовать с сотрудников соблюдения сроков и тем самым контролировать ход проекта.

Даже самый продуманный план эвристического проекта быстро разойдется с реальностью, а значит, исполнители будут руководствоваться заведомо устаревшими инструкциями. Такие проекты требуют иного, «гибкого подхода» к управлению, в основе которого лежит планирование короткими итерациями, продумывание итераций непосредственными исполнителями и самоорганизация исполнителей в команды.

Итеративное планирование малыми циклами

Эвристический проект следует рассматривать как ряд итераций – небольших подпроектов, имеющих практическую ценность для заказчика. Каждая итерация состоит из задач - совокупности проблем, которые требуется решить, и работ, которые требуется выполнить, для ее успешного окончания.

Такой подход активно используется при разработке программного обеспечения, например, в методологии «Scrum» [7]. В начале работ заказчик, как правило, еще не может точно описать все желаемые характеристики готового продукта, а лишь обобщенно представляет набор желаемых функций. Поэтому сложное программное обеспечение обычно разрабатывается не как единый длинный проект, а итерациями длиной в 2-4 недели. На выходе итерации заказчик получает обновленную версию продукта с добавленным функционалом, которую он сразу же может начинать использовать и тестировать в реальных условиях.

Бизнес-задачу на следующую итерацию заказчик определяет непосредственно перед ее началом, исходя из результатов предыдущей итерации и текущих потребностей. Подробное планирование осуществляется лишь на один цикл вперед. К моменту окончания проекта, результат может радикально отличаться от первоначального замысла, но будет значительно ближе текущим потребностям заказчика и рынка.

Аналогичный подход может быть применен и для других проектов, состоящих из эвристических задач. Научное исследование, рекламную кампанию или управление продуктом также следует планировать имеющими практическую значимость итерациями (проверить гипотезу, протестировать рекламное объявление и т.п.). Переходить к подробному планированию следующих этапов имеет смысл лишь тогда, когда предыдущие этапы завершены. Такой подход снижает риск ошибки планирования и помогает быстро реагировать на изменения рынка.

Самостоятельное планирование работы каждым сотрудником

Традиционно необходимость планирования всего проекта его руководителем была обусловлена необходимостью согласования усилий работников. Руководитель проекта был единственным человеком, который видел все взаимосвязи задач, тогда как непосредственные исполнители знали лишь свою маленькую задачу, смутно представляя, как она связана с работой их коллег и как влияет на конечный результат.

Современные информационные системы позволяют преодолеть это ограничение. В единой интерактивной информационной системе руководителю достаточно поставить цель итерации, а детальное планирование должны взять на себя непосредственные исполнители.

Самостоятельное планирование работниками своих задач в единой интерактивной информационной системе имеет ряд преимуществ:

- лучше понимая детали своей работы, сотрудники точнее прогнозируют состав и сроки исполнения задач;
- благодаря согласованию действий на едином графике работ, снижается число как “ненужных”, так и “забытых” задач;
- повышается мотивация и чувство ответственности за результат работ;
- любые изменения сразу же становятся известны всем участникам проекта. Руководителю не нужно тратить время на информирование сотрудников и согласование их работы;
- оперативный контроль может осуществляться даже без непосредственного участия руководителя. Ответственный за следующую задачу самостоятельно проверит исполнителя предыдущей задачи, как при планировании, так и в процессе ее выполнения.

При этом, всегда имея под рукой текущую версию плана, руководитель может в любой момент убедиться в том, что ни одна задача не была упущена из виду.

Самоорганизация команд

Поскольку состав задач заранее неизвестен, руководитель не сможет распределить их между сотрудниками на этапе планирования проекта. Сотрудники должны напрямую ставить задачи коллегам и самостоятельно принимать решения о выполнении своих задач, исходя из здравого смысла и интересов организации. Однако все такие решения должны быть зафиксированы в единой информационной системе.

Допустим, маркетологу нужна помощь дизайнеров при разработке буклета. Он ставит соответствующую задачу одному из них в единой информационной системе. Получив задачу, дизайнер самостоятельно оценивает ее приоритет по сравнению с другими своими задачами и планирует сроки ее выполнения. Более того, он может передать задачу коллеге, если считает, что так она будет выполнена быстрее.

Все принятые исполнителями решения при таком подходе контролируются не до их принятия, а после. Таким образом, уменьшается административная функция руководителя, связанная с согласованием действий исполнителей, и резко увеличивается скорость работы. Более того, действия сотрудника контролируются не только руководителем, но и коллегами, которые будут недовольны, если решат, что кто-то перекладывает на них свою работу. Все выполненные сотрудниками задачи отмечаются в информационной системе, а значит, руководителю легко оценить производительность любого сотрудника за любой период.

Такой подход обеспечивает равномерное распределение нагрузки даже тогда, когда структура проекта постоянно меняется и состоит из сложных взаимосвязей большого числа исполнителей. Быстрое и эффективное распределение задач одним менеджером в таких условиях невозможно.

Важнейшим условием применения данного подхода является понимание сотрудниками общих приоритетов организации, исходя из которых, они должны принимать решения. В случае, когда сотрудники не могут самостоятельно расставить приоритеты задачам, они должны обратиться к руководителю проекта, который укажет, что должно быть сделано в первую очередь.

Практическое применение

В отрасли информационных технологий гибкое управление проектами является стандартом для абсолютного большинства передовых компаний, как например, Microsoft, Siemens, Nokia, Google или Motorola [7]. Более того, согласно исследованиям в 2012 году более 80% фирм, занимающихся разработкой программного обеспечения, используют методологию Scrum как основу процесса управления проектами, называя главными преимуществами подхода «возможность легко менять приоритеты», «информационную прозрачность проектов» и «повышение производительности» [9].

Уже сегодня есть примеры использования гибкого управления проектами и вне сферы информационных технологий. Так в 2008 команда из нескольких десятков работающих бесплатно волонтеров из разных странах, вышли в финал престижного конкурса среди производителей автомобилей, создав действующий прототип суперлегкого автомобиля, соответствующего всем требованиям безопасности с расходом, 2,5 литра бензина на 100 км. Используя гибкое управление проектами, они создали первый прототип за 3 месяца, тогда как у автопроизводителей проработка прототипа занимает в среднем 10-15 лет [8].

Успех гибкого управления проектами именно в области информационных технологий объясняется тем, что эта отрасль является одной из самых быстроизменяющихся. Постоянно появляющиеся новые технологии, а также глобальная конкуренция на рынке IT услуг, заставляет разработчиков пересматривать планы и менять цели уже идущих проектов, что невозможно при использовании классических методов.

Однако скорость изменений рынка и требований покупателей сегодня возрастает во всех отраслях. В результате все большее количество людей работают в области решения эвристических задач и проектов, где быстрая реакция на изменения важнее детального планирования. Алгоритмические

же задачи все больше автоматизируются, поскольку компьютер многократно превосходит человека по точности следования инструкциям.

Таким образом, уже в самом ближайшем будущем описанные в данной работе принципы гибкого управления проектами будут востребованы в самых разных областях деятельности.

Внедрение гибкого управления проектами

Внедрение такого подхода требует выполнения двух условий. Во-первых, требуется внедрить информационную систему, где четко отслеживаются все возникающие задачи и все движения информации в организации. Такими системами являются, например, Wrike, Basecamp или Attask [10, 11, 12]. Без достижения соответствующей информационной прозрачности самоорганизация исполнителей невозможна и приведет к потере управляемости организацией.

Во-вторых, требуется постепенно изменить культуру менеджмента в организации, перенаправляя ответственность за принятие решений с менеджеров на непосредственных исполнителей. В эвристических проектах вся команда должна нести ответственность за проект в равной степени, для того, чтобы переключить фокус с поиска виновного в проблеме на поиск ее решения. Такой переход может быть довольно сложным, поскольку в корне отличается от традиционных подходов, где ответственность разделена между исполнителями и возрастает по мере возрастания полномочий. Именно изменение культуры менеджмента является самым большим препятствием внедрению гибкого управления – руководителям организаций требуется понять, что при правильной организации работы ослабление контроля ведет не к снижению эффективности и управляемости, а к их повышению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54869-2011 «Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом»
2. Зуховицкий С. И., Радчик И. А., Математические методы сетевого планирования, М., 1965.
3. Соколицын С. А., Дуболазов В. А., Домченко Ю. Н., Многоуровневая система оперативного управления ГПС в машиностроении - Л.: Спб.:Политехника, 1991. - 208 с.
4. A Guide to the Project Management Body of Knowledge – Project Management Institute, 4th edition, 2009 - 459 pages.
5. Daniel H. Pink, Drive: The Surprising Truth About What Motivates Us - Riverhead Books, 2011 – 272 p.

6. K. Beck, Extreme Programming Explained: Embrace Change, 2nd Edition, Addison-Wesley – 224 p.
7. K. Schwaber, J. Sutherland, The scrum guide http://www.scrum.org/Portals/0/Documents/Scrum%20Guides/Scrum_Guide.pdf
8. S. Penkar, Joe Justice built a 100mpg car using principles of agile, lean and scrum. How did he do it? http://futureofprojectmanagement.com/2011/12/02/joe-justice-built-a-100mpg-car-using-principles-of-agile-lean-and-scrum-how-did-he-do-it/
9. VersionOne Inc, 7th Annual State of Agile Development Survey http://www.versionone.com/pdf/7th-Annual-State-of-Agile-Development-Survey.pdf
10. http://www.attask.com – система для управления проектами онлайн
11. http://www.basecamp.com – система для управления проектами онлайн
12. http://www.wrike.com – система для управления проектами онлайн

УДК 519.86

Н. С. Лукашевич, Д. А. Гаранин

ОЦЕНКА ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ И СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ СУБЪЕКТИВНОСТИ



Никита Сергеевич Лукашевич, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра предпринимательства и коммерции
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(931) 252-66-22, E-mail: lukashevich@kafedrapik.ru



Дмитрий Анатольевич Гаранин, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра предпринимательства и коммерции
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(911) 924-09-55, E-mail: garanin@kafedrapik.ru

Аннотация

Принятие инвестиционного решения в общем случае представляет собой оценку предлагаемых инвестору альтернатив по совокупности показателей. Представляется целесообразным использовать метод потенциального распределения вероятностей в условиях, когда инвестору известны лишь данные о соответствующих частных характеристиках проекта. Представлена апробация метода, и показано, что количественные оценки, рассчитанные по этому методу, относительны и в сильной степени зависят от выбора базового проекта.

Ключевые слова: критерий Байеса, субъективность, энтропия Шеннона, сводный показатель

N. S. Lukashevich, D. A. Garanin

THE EVALUATION OF INVESTMENT ATTRACTIVENESS OF THE PROJECT USING THE GENERALIZED INDICATOR AND REDUCING THE DEGREE OF SUBJECTIVITY

Nikita S. Lukashevich[1], e-mail: lukashevich@kafedrapik.ru;
Dmitriy A. Garanin[1], e-mail: garanin@kafedrapik.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

In general, investment decision is an evaluation of the proposed alternatives for the investor using a set of indicators. It seems to be appropriate to use a method of the potential distribution of probabilities when investors know only the data of relevant characteristics of the investment projects. The application of the method is presented and it is shown that the quantitative estimates calculated by this method are relative and strongly depend on the choice of the base project.

Key words: generalized indicator, Bayesian criterion, Shannon entropy, subjectivity

Принятие инвестиционного решения в общем случае представляет собой оценку предлагаемых инвестору альтернатив по совокупности показателей и выбор из них по некоторым признакам проекта, удовлетворяющим имеющимся условиям (ограничениям). При этом для упрощения обычно, многокритериальную задачу сводят к однокритериальной путем введения комплексного критерия [5]. В нашем случае таким критерием может служить обобщенный показатель инвестиционной привлекательности проекта.

Для свертки частных показателей, характеризующих тот или иной инвестиционный проект (ИП) представляется целесообразным воспользоваться методом потенциального распределения вероятностей. Информационная ситуация, при которой используют данный метод, характеризуется тем, что инвестору часто известны лишь данные о соответствующих частных характеристиках ИП. В этом случае представляется целесообразным выдвигать гипотезу о линейной свертке некоторых частных безразмерных показателей [5]. Для определения весовых коэффициентов такой свертки существует достаточное количество различных методов. Все они базируются на той или иной модели поведения среды, которое, как правило, постулируется неформальным образом. Между тем, большей объективностью обладают модели, построенные с использованием принципа максимума неопределенности. Одним из возможных подходов оценки указанных весовых коэффициентов, который базируется на этом принципе, является метод потенциального распределения вероятностей. Содержание рассматриваемой ситуации при этом может быть представлено следующей схемой.

Пусть рассматриваются n ИП, которые по своему назначению и содержанию представляются как конкуренты некоторого прототипа. Каждому из этих ИП поставлена в соответствие совокупность характеристик, определяющих его инвестиционную привлекательность. Пусть таких характеристик будет m. Обозначим через x_{ij} ($i=1…n$, $j=1…m$)

частные показатели сравниваемых проектов. Исходные данные при этом удобно располагать в виде матрицы

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & x_{m1} \\ x_{12} & x_{22} & x_{m2} \\ x_{1n} & x_{2n} & x_{mn} \end{bmatrix}.$$

Вес *j*-й характеристики в распределении средств на достижение требуемого уровня эффективности ИП в общем случае неизвестен. Требуется произвести оценку веса каждой характеристики в распределении средств с учетом объективно существующей неопределенности.

Принцип потенциального распределения постулирует применение для сравнения критерия Байеса в качестве комплексного показателя, отражающего инвестиционную привлекательность проекта. Он имеет следующий вид

$$b_i = \sum_{j=1}^{m} p_j r_{ij}$$

где r_{ij} - безразмерные показатели, причем $r_{ij}=x_{ij}/x_{эj}$, если увеличение x_{ij} приводит к росту b и $r_{ij}=x_{эj}/x_{ij}$, если увеличение x_{ij} приводит к уменьшению b; $x_{эj}$ - характеристика эталона, в качестве которого рассматривается любой из представленных ИП.

Тогда весовые коэффициенты p_j, $(j=1...m)$, отражающие определенную модель поведения среды, находятся путем максимизации энтропии Шеннона [1, 3]

$$H = -\sum_{j=1}^{m} p_j \ln p_j \to \max$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^{m} p_j = 1, \quad \prod_{j=1}^{m} r_j^{-p_j} = const.$$

Можно показать, что выражение для оценок весовых коэффициентов в этом случае имеет следующий вид

$$p_j = \left(\sum_{i=1}^{n} r_{ij} \right)^{-1} \left[\sum_{j=1}^{m} \left(\sum_{i=1}^{n} r_{ij} \right)^{-1} \right]^{-1}.$$

Ограничения постулируют условие нормирования и постоянство среднегеометрического. Физически это означает, что относительное приращение веса *j*-й характеристики пропорционально относительному приращению показателя относительно уровня этой же характеристики по

всей совокупности рассматриваемых ИП, причем коэффициент пропорциональности зависит от достигнутого уровня. Таким образом, рассчитав коэффициенты значимости, можно не только ранжировать частные показатели по их вкладу, но и выбрать из предложенных альтернатив наиболее привлекательный ИП. Работоспособность метода демонстрируется следующим примером. Исходные данные для пяти характерных показателей пяти альтернативных ИП приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики альтернативных инвестиционных проектов

Характеристики проектов	**Проекты**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1. Чистый дисконтированный доход (NPV), млн. руб.	1	1.3	0.7	2.6	1.1
2. Индекс доходности (PI)	1.2	1.5	1.3	1.7	1
3. Внутренняя норма доходности (IRR), %	15.5	14.2	17.5	13	17
4. Рентабельность инвестиций (ROI), %	45	30	65	35	50
5. Срок окупаемости, лет	3	4	5	3	6

Приведенная матрица исходных данных, рассчитанных по выражениям, где за эталон принят ИП 1, выглядит следующим образом

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1{,}3 & 0{,}7 & 2{,}6 & 1{,}1 \\ 1 & 1{,}25 & 1{,}08 & 1{,}42 & 0{,}83 \\ 1 & 0{,}92 & 1{,}13 & 0{,}84 & 1{,}1 \\ 1 & 0{,}67 & 1{,}44 & 0{,}78 & 1{,}1 \\ 1 & 0{,}75 & 0{,}6 & 1 & 0{,}5 \end{bmatrix}.$$

Тогда, матрица комплексных показателей инвестиционной привлекательности альтернативных ИП

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0{,}94 & 0{,}98 & 1{,}24 & 0{,}9 \end{bmatrix}.$$

При этом весовые коэффициенты частных характеристик ИП, сведены в табл. 2. Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод, что наиболее привлекательным для инвестора является ИП 4, поскольку у него самый высокий обобщенный показатель.

Учет субъективных оценок важности характеристик ИП

Другой вывод, который можно сделать на основании приведенных исходных данных и расчетов, заключается в том, что определяющей характеристикой рассматриваемых ИП является срок окупаемости, который имеет наибольший весовой коэффициент. Однако имеет смысл учесть мнение и опыт квалифицированных специалистов в оценке

важности характеристик ИП. С этой целью целесообразно при формировании матрицы учесть субъективное мнение экспертов.

Таблица 2

Важность (значимость) характеристик ИП

Характеристики ИП	**Весовые коэффициенты (важность, значимость)**
1. Чистый дисконтированный доход (NPV)	0,16
2. Индекс доходности (PI)	0,18
3. Внутренняя норма доходности (IRR)	0,20
4. Рентабельность инвестиций (ROI)	0,20
5. Срок окупаемости	0,26

Обычно подобные задачи решаются путем выставления некоторых оценок (как правило, в баллах) той или иной характеристике, а затем характеристикам присваивается весовой коэффициент для свертки их в некий обобщенный показатель. Однако, проблема, в этом случае, заключается в формализации интуитивного подхода, которая проявляется уже на этапе выставления оценок. Более объективным следует признать метод, основывающийся на минимизации участия мнения экспертов. Такой подход требует от экспертов лишь расставить ряд предпочтений характеристикам ИП, а весовые коэффициенты рассчитываются с использованием принципа максимума неопределенности. Можно показать, что в данных условиях наибольшей объективностью обладают оценки Фишборна [3, 6]

$$\hat{p}_j = \frac{2(m-l+1)}{m(m+1)},$$

где m - количество оцениваемых характеристик; l - ранг в шкале приоритетов для j-й характеристики.

Предположим, что, по мнению экспертов, расстановка приоритетов среди характеристик ИП и соответствующие весовые коэффициенты выглядят, как представлено в табл. 3.

Таблица 3

Субъективная приоритетность характеристик ИП

Характеристики ИП	**Приоритет**	**Весовые коэффициенты**
1. Чистый дисконтированный доход (NPV)	4	0,13
2. Индекс доходности (PI)	3	0,20
3. Внутренняя норма доходности (IRR)	5	0,07
4. Рентабельность инвестиций (ROI)	1	0,33
5. Срок окупаемости	2	0,27

Тогда весовые коэффициенты характеристик ИП с учетом субъективного фактора можно рассчитать по выражению

$$Q_j = \gamma P_{Эj} + (1-\gamma) P_{Пj},$$

где γ - степень доверия мнению экспертов; $P_{Эj}$ - экспертная (субъективная) оценка j-го весового коэффициента; $P_{Пj}$ - потенциальная (объективная) оценка j-го весового коэффициента; m - количество оцениваемых параметров.

Результаты такого перерасчета при пятидесяти процентной степени доверия мнению экспертов сведены в табл. 4. Анализ результатов свидетельствует о чувствительности метода как к объективным, так и к субъективным факторам (см. табл. 2 и 4). Меняя γ от полного недоверия (0%) до абсолютного доверия (100%), можно убедиться в сходимости результатов к предельным значениям для чисто объективной или чисто субъективной оценкам.

Таблица 4

Обобщенные оценки важности характеристик ИП

Характеристики ИП	**Важность характеристик**
1. Чистый дисконтированный доход (NPV)	0,14
2. Индекс доходности (PI)	0,19
3. Внутренняя норма доходности (IRR)	0,13
4. Рентабельность инвестиций (ROI)	0,27
5. Срок окупаемости	0,27

Учет мнений экспертов в оценке альтернативных ИП

Выше был рассмотрен вопрос учета субъективного мнения экспертов при оценке значимости характеристик ИП. Вторая шкала исходной табл. 1 включает перечень ИП. Следовательно, мнения экспертов необходимо формализовать и при учете предпочтений среди ИП. Согласно мнению экспертов ИП ранжируются по предпочтительности, а затем рассчитываются оценки весовых коэффициентов, количественно отражающих меру их предпочтения (учет субъективного фактора второго порядка).

В условиях решаемой задачи предположим, что оценка экспертов позволила расположить ИП в порядке предпочтения, представленном в табл. 5. Из результатов расчетов, сведенных также в табл. 5, видно, что субъективные оценки экспертов не совпадают с более объективными потенциальными оценками.

Таблица 5

Учет мнения экспертов в оценке предпочтения ИП

Показатели	**Проекты**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Приоритет ИП в ряду предпочтений	2	1	4	5	3
Оценка «веса» предпочтений	0,27	0,33	0,13	0,07	0,2
«Потенциальная оценка»	1	0,94	0,98	1,24	0,9
Обобщенная оценка инвестиционной привлекательности	0,64	0,64	0,56	0,66	0,55

Таким образом, наиболее предпочтительным для инвестирования средств является проект 4.

Исследование влияния выбора эталона

Выше было показано, что формализация информационной ситуации потенциального распределения вероятностей предполагает формирование критерия Байеса, для оценки весовых коэффициентов которого вводятся в рассмотрение безразмерные показатели r_{ij}. При этом используется понятие «эталон», в качестве которого может быть любой из рассматриваемых проектов. На самом деле, при использовании метода необходимо учитывать следующую особенность.

Зададимся абстрактной матрицей X, которая содержит m частных показателей (характеристик) неких n сравниваемых проектов в виде табл. 6.

Таблица 6

Исходные данные для исследования

Характеристики *(j)*	**Проекты *(i)***				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	11	34	24	67	76
2	23	23	54	46	34
3	21	12	34	45	56
4	23	32	23	32	23
5	43	56	12	11	44

Для перехода к безразмерной матрице показателей используем выражение $r_{ij}=x_{ij}/x_{Бj}$.

Приведенная таблица исходных данных при выборе образца 1 в качестве эталона (базового проекта) выглядит следующим образом (см. табл. 7).

Таблица 7

Приведенная таблица исходных данных (проект 1 – базовый)

Характеристики *(j)*	**Образцы *(i)***				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	1	3,09	2,18	6,09	6,90
2	1	1,00	2,34	2,00	1,47
3	1	0,57	1,61	2,14	2,66
4	1	1,39	1,00	1,39	1,00
5	1	1,30	0,27	0,25	1,02

Использование модели при выборе проекта 1 в качестве базового (эталона) дает следующие значения весовых коэффициентов

$$P^{(1)} = \begin{bmatrix} 0{,}07 & 0{,}17 & 0{,}17 & 0{,}23 & 0{,}36 \end{bmatrix}^T.$$

Аналогичным образом рассчитываются весовые коэффициенты при выборе в качестве базового проектов 2, 3,… Анализируя результаты, нельзя не признать, что выбор проекта в качестве базового существенно влияет на весовые коэффициенты их характеристик. Говоря иначе, вес частного показателя в комплексную характеристику проекта сильно зависит от выбора базового объекта для сравнения. Поэтому, поскольку весовые коэффициенты нужны только для внутренних операций, использование их для других целей вне данного метода является некорректным.

Рассмотрим влияние выбора базового проекта на комплексный показатель. Для этого, используя приведенные выше «веса» P_j, $j=1...m$, рассчитаем значения показателя для различных случаев выбора базового проекта:

$$b^{(1)} = \begin{bmatrix} 1{,}00 & 1{,}27 & 1{,}17 & 1{,}56 & 1{,}79 \end{bmatrix};$$

$$b^{(2)} = \begin{bmatrix} 0{,}79 & 1{,}00 & 0{,}92 & 1{,}22 & 1{,}41 \end{bmatrix};$$

$$b^{(3)} = \begin{bmatrix} 0{,}86 & 1{,}09 & 1{,}00 & 1{,}33 & 1{,}53 \end{bmatrix};$$

$$b^{(4)} = \begin{bmatrix} 0{,}64 & 0{,}82 & 0{,}75 & 1{,}00 & 1{,}15 \end{bmatrix};$$

$$b^{(5)} = \begin{bmatrix} 0{,}56 & 0{,}71 & 0{,}65 & 0{,}87 & 1{,}00 \end{bmatrix}.$$

Сравнение $b^{(i)}$, $i=1...n$ между собой показывает, что выбор базового проекта также сильно влияет и на абсолютные значения комплексного показателя. Поэтому они (значения) могут использоваться лишь для сравнения по принципу «лучше-хуже» при формировании ряда предпочтений исследуемым проектам. Так, нетрудно убедиться, что во всех случаях выбора базового проекта ряд предпочтений остается

неизменным: 5, 4, 2, 3, 1, несмотря на то, что абсолютные значения существенно колеблются при смене базового проекта.

Таким образом, потенциальное распределение вероятностей с успехом может использоваться для качественного сравнения проектов в виде ряда предпочтений. Количественные оценки как весовых коэффициентов, так и комплексных показателей, рассчитанные по этому методу, относительны и в сильной степени зависят от выбора базового проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаранин Д.А., Дуболазов В.А., Лукашевич Н.С. Про обобщенный показатель инвестиционной привлекательности проектов // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития ‘2012». – Выпуск 3. Том 23. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – ЦИТ: 312-423 – С. 73-76.
2. Дуболазов В.А., Череватенко В.Н. Экстраполяция функции распределения при сегментировании рынка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — СПб., 2012.— № 2-1(144): Экономические науки. — С. 132-137 .
3. Ивченко Б.П., Мартыщенко Л.А., Табухов М.Е. Управление в экономических и социальных системах. Системный анализ. Принятие решений в условиях неопределенности. – СПб.: «Нордмед-Издат», 2001. – 248 с.
4. Тихонов Д. В. К вопросу о вероятностном подходе в медиапланировании // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — СПб., 2010. — №2(96).— С. 176-181 .
5. Хованов Н. В. Оценка сложных экономических объектов и процессов в условиях неопределенности. К 95-летию метода сводных показателей А. Н. Крылова // Вестник СПбГУ. Сер. 5. – 2005. – Выпуск. 1. — С. 138-144.
6. Fishburn P.O. The axioms of subjective probability // Stat. Sci. 1986. V.1. N3.

УДК 621.746

В.И. Маслов, А.И. Арустамян, В.Ф. Минаков

ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЗАЛИВКИ МЕТАЛЛА



Владимир Иванович Маслов**,** д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой конструкторско-технологических инноваций
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: (812)-534-0764, E-mail: ukti@spbstu.ru



Арам Иванович Арустамян, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия Тел.: (812)-534-0764, E-mail: arustam@inbox.ru



Владимир Федорович Минаков, д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет экономики и финансов
Россия Тел.: (812) 710-5751, E-mail: m-m-m-m-m@mail.ru

Аннотация

Для повышения качества изготовления поршневых колец методом Парето выявлен технологический этап – литье чугуна в формы, максимально влияющий на качество колец. Предложено устройство дистанционного контроля позиционирования ковша с расплавленным металлом. Спектрофотометром швейцарской фирмы X-Rite исследованы характеристики отражения объекта. Доказана возможность моделирования спектральных характеристик линейно-гармоническими функциями. Для метрологических уровней погрешностей определено требуемое число членов ряда разложения.

Ключевые слова: качество, поршневые кольца, спектральная характеристика

V.I. Maslov, A.I. Arustamian, V.F. Minakov

REMOTE CONTROL IN THE CONTROL SYSTEM OF QUALITY OF FILLING OF METAL

Dr. Vladimir I. Maslov[1], e-mail: ukti@spbstu.ru;
Aram I. Arustamian[1], e-mail: arustam@inbox.ru;
Dr. Vladimir F. Minakov[2], e-mail: m-m-m-m-m@mail.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia;
[2]FINEC, St.Petersburg, Russia.

Abstract

For improvement of quality of production of piston rings by Pareto's method the technological stage – cast iron molding in the forms, most influencing quality of rings is revealed. The device of remote control of positioning of a ladle with the melted metal is offered. The spectrophotometer of the Swiss firm X-Rite investigated characteristics of reflection of object. Possibility of modeling of spectral characteristics linearly - harmonious functions is proved. For metrological levels of errors the demanded number of members of a number of decomposition is defined.

Key words: quality, piston rings, spectral characteristic.

Годы, прошедшие после начала глобального кризиса в 2008 году, обострили конкуренцию на мировых рынках, особенно – на рынках продукции металлургии и машиностроения. Сложившая ситуация настоятельно требует повышения качества выпускаемых отечественным производством изделий. Мировые лидеры машиностроения для повышения качества продукции, а соответственно – ее конкурентоспособности ориентируются на перманентное внедрение инновационных решений, в том числе - технологических.

В этой связи актуальным становится обоснование и принятие оптимальных решений по совершенствованию управления качеством продукции и снижения себестоимости ее производства в условиях каждого конкретного предприятия [1-4]. В большой степени это относится к машиностроительной продукции, особенно – после вступления России в ВТО. Объектом исследования является машиностроительная продукция – поршневые кольца, широко применяемые в двигателях внутреннего сгорания автомобилей, тракторов и т.д.

Важнейшими характеристиками производства поршневых колец являются качество продукции, а соответственно – конкурентоспособность и ликвидность. Выявлены операции технологического процесса, оказывающие влияние на показатели качества поршневых колец, обследованы дефекты отливок. Результаты дифференциации дефектов и их причин сведены в таблицу 1.

Авторские результаты регистрации случаев снижения качества колец в функции этапов технологического процесса отражены на диаграмме Парето (рис. 1), позволяющие ранжировать указанные этапы по степени

влияния на качество колец.

Таблица 1. Показатели несоответствия качества поршневых колец

Этап производства	Экспериментальные данные случаев отклонения качества	Доля дефектов	Процент дефектов
Чертеж изделия	0	0	0
Чертеж отливки	0	0	0
Чертеж модели	0	0	0
Стержни	15	0,047	4,67
Сушка	8	0,025	2,49
Сборка	16	0,05	4,98
Заливка	162	0,505	50,47
Затвердевание	7	0,022	2,18
Выбивка	33	0,103	10,28
Отделение	31	0,097	9,66
Термообработка	49	0,153	15,26
Контроль	0	0	0
Все этапы	321	1	100

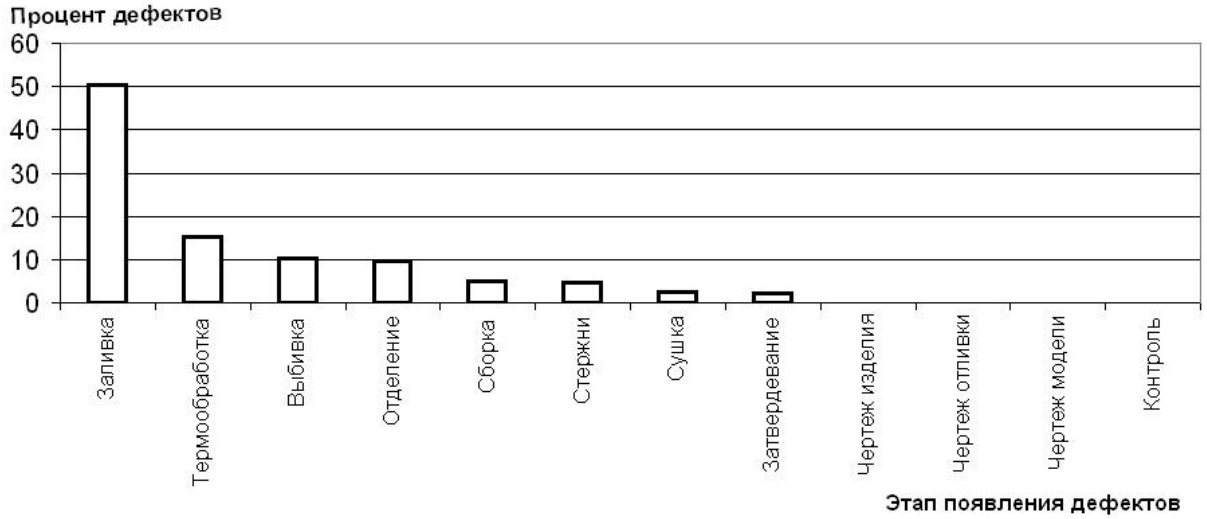


Рис.1. Диаграмма Парето

Проведен АВС анализ по кумулятивной кривой дефектов, на которой выделена область «А», критическая для предприятия (рис. 2).

Зона «А» экономически наиболее важна для повышения рентабельности производства. Именно в диапазоне «А» дополнительные затраты (материалы, электроэнергия, оплата труда и т.п.) снижают прибыль предприятия. Выявление данной зоны и обеспечение качества заливки металла позволяет получить наибольший экономический эффект.

В существующей технологии литья заготовок поршневых колец соблюдение требуемых параметров заливки (высота струи расплавленного металла, весовая скорость заливки) обеспечивается органолептическим

контролем (визуально) заливщиком металла, что означает влияние человеческого фактора на технологический процесс. В зависимости от физического и эмоционального состояния заливщика находится и стабильность параметров заливки. В частности, требуемая высота струи заливаемого металла при изготовлении поршневых колец составляет 225 мм (с допуском отклонений в 25 мм) от кромки верхней опоки до носка ковша с расплавленным металлом. В случае отклонения высоты позиционирования ковша в сторону повышения происходит разрушение струей металла песчаной формы, и заливаемый металл вытекает из заформованной стопки. Кроме того, происходит засасывание воздуха окружающей атмосферы в заливочную форму, что в конечном итоге, ведет к получению дефектной или некачественной продукции. Так как на изготовление бракованных отливок затрачиваются трудовые и материальные ресурсы, то рентабельность производства становится низкой, а предприятие – неконкурентоспособным.

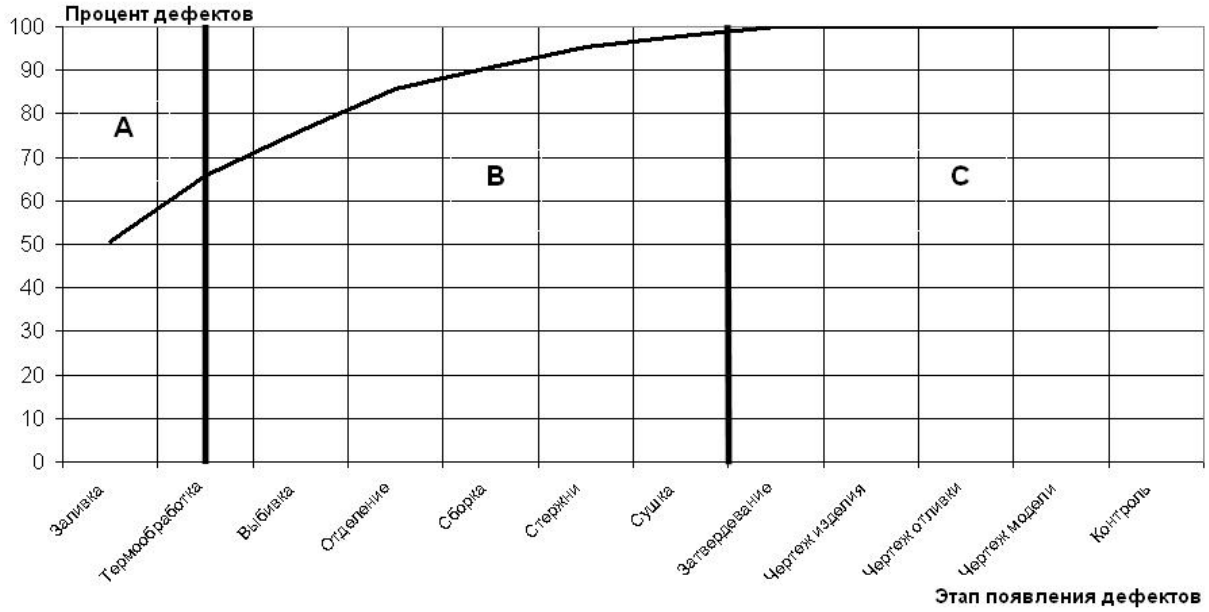


Рис. 2. Кумулятивная кривая дефектов и ABC области

В случае понижения высоты струи менее требуемой величины нет достаточного давления заливаемого металла в формы и, как результат, появляются дефекты, неспаи, газовые раковины, неметаллические включения в виде частиц песчаной формы. Такая нестабильность технологического процесса также негативно сказывается на качестве продукции, а также ее себестоимости.

На рис. 3 представлен процесс позиционирования ковша при литье металла и органолептическом его контроле на основе восприятия органами зрения заливщика с превышением допустимой высоты, а соответственно – характерным дефектом: разрушением заливочной формы и вытеканием металла.



Рис. 3. Разрушение заливочной формы при завышенном положении ковша с металлом

Задачи управления параметрами производственных процессов методами дистанционного неразрушающего контроля состава, наличия, позиционирования деталей, узлов, машин, материалов и других объектов, являются весьма распространенными. Такой контроль является неотъемлемой частью конвейерных производств, а также систем управления движущимися и удаленными объектами, на которые исключается возможность механического воздействия контактными датчиками по технологическим условиям (температурным для расплавленных металлов, прочностным для высокотехнологичных производств микроэлектроники, габаритным для нанотехнологий) и т.п.

Для решения поставленной задачи выполнен анализ известных способов дистанционного контроля спектральных характеристик объектов в технологических процессах [6, 7]. Он позволил установить, что существующие технологические решения основаны на регистрации спектральных характеристик, то есть измерении зависимостей интенсивности отраженных сигналов (или излучений) от длины волны в диапазоне от 200...400 до 800...1000 нм. Такой способ позволяет решать поставленную задачу, однако, стоимость спектрографов, спектрометров, спектрофотометров, позволяющих измерять интенсивность спектров в функции длины волны, столь высока, что затраты на их приобретение и установку в технологических процессах делает производство экономически неэффективным, а продукцию – неконкурентоспособной и неликвидной.

Задача настоящей работы – совершенствование системы управления

качеством производства поршневых колец (для снижения его себестоимости) методом оптического контроля позиционирования ковша с расплавом при заливке форм.

Предлагается более эффективный способ представления спектральных характеристик объектов и характеристик чувствительности датчиков. Для обоснования способа было выполнено измерение интенсивности отраженного оптического сигнала для образца (объекта, выполненного из чугуна) – рис. 4 (эксперимент выполнен на метрологической основе спектрофотометра марки Colormunki, производство фирмы X-Rite, Швейцария, а также программного обеспечения DispCal GUI и управления ОС Windows).

Спектральную характеристику $f_э(\lambda)$ предлагается представлять результатами разложения в ряд Фурье. Однако значения интенсивностей отражения начала и конца спектрального диапазона ($\lambda_{min}, \lambda_{max}$) по результатам эксперимента и моделирования имеют максимальные отличия. Для повышения точности моделирования спектра дополнительно предлагается введение линейной функции длины волны с коэффициентом *b*:

$$b = \frac{f_э(\lambda_{max}) - f_э(\lambda_{min})}{\lambda_{max} - \lambda_{min}}. \qquad (1)$$



Рис. 4. Разложение спектральной характеристики образца в линейно-гармонический ряд

Линейная функция используется для получения функции $f_{э,п}(\lambda)$, отвечающей условиям Дирихле (путем вычитания ее из значений спектра объекта, полученных экспериментально):

$$f_{э,п}(\lambda) = f_э(\lambda) - b \cdot \lambda, \qquad (2)$$

которую можно представить гармоническим рядом Фурье в функции от аргумента *x* на периоде 2π, соответствующем интервалу $\lambda_{max} - \lambda_{min}$:

$$x = \omega \cdot \lambda = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\lambda - \lambda_{min}}{\lambda_{max} - \lambda_{min}}, \quad (3)$$

$$f(x) == a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_{k'} \cdot \cos k \cdot x + a_{k''} \cdot \sin k \cdot x \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot dx \quad (5)$$

$$a_{k'} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot dx \quad k=1, 2, \ldots \quad (6)$$

$$a_{k''} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot dx \quad k=1, 2, \ldots \quad (7)$$

Аналогичное разложение спектральных характеристик чувствительности датчиков (например, фотодиодов), позволяет производить их выбор по критерию допустимости погрешности:

$$a_{k'} - a_{k',\partial} < \varepsilon, \quad a_{k''} - a_{k'',\partial} < \varepsilon, \quad (8)$$

где ε – допустимая для конкретной задачи идентификации погрешность.

Для доказательства применимости предложенного способа исследована зависимость погрешности аппроксимации спектра линейно-гармоническими рядами в функции от количества используемых членов ряда Фурье – таблица 2. Постоянная составляющая ряда Фурье a_0=0,61468 относительных единиц (о.е.) при нормировании интенсивности отраженного спектра к единичному значению при его максимуме. Тангенс угла наклона линейной компоненты равен b=0,0014346.

Результаты, приведенные в таблице 2, позволяют сделать следующие выводы. Табличной форме представления спектральных характеристик (предполагающая совокупность сотен пар данных) можно противопоставить альтернативу: одну пару численных значений, а именно, коэффициентов функции линейной аппроксимации и одну пару амплитудных значений гармонических составляющих. Погрешность такого представления спектральной характеристики образца (изделия из чугуна) не превышает 4%. Следовательно, линейно-гармонический способ аппроксимации обеспечивает погрешность, достаточную для измерительных приборов, и может применяться для метрологических задач. Повышение числа учитываемых гармоник до 6-ти повышает класс точности представления измерения спектральных характеристик до 1 (с приведенной погрешностью менее 1%), а учет 11-ти гармоник снижает погрешность 0,5%.

На рис. 5 представлена схема автоматизированного контроля высоты расположения заливочного ковша [6].

Таблица 2. Погрешности разложения спектральной характеристики

Число гармоник ряда Фурье	Амплитуды гармоник		Средняя погрешность
	Косинусоидальной	Синусоидальной	
1	-0,036694854	-0,007544815	3,96%
2	-0,006895065	-0,041405260	2,52%
3	0,025988274	-0,000127576	1,87%
4	-0,001988306	0,019622916	1,34%
5	-0,012935454	-0,001251574	1,15%
6	0,000315431	-0,010941673	0,91%
7	0,008287900	0,001011139	0,80%
8	-0,000775432	0,006722954	0,76%
9	-0,006636308	-0,001216115	0,70%
10	0,000889407	-0,006536407	0,60%
11	0,005433259	0,000836082	0,50%
12	-0,000551821	0,003558956	0,47%
13	-0,003157161	-0,000936825	0,45%
14	0,001267087	-0,003209484	0,44%
15	0,003650987	0,001018170	0,40%
16	-0,001075222	0,002485946	0,38%
17	-0,002099956	-0,001005920	0,42%
18	0,000865523	-0,003021130	0,43%
19	0,003362577	0,000630892	0,39%
20	-0,001186640	0,002683981	0,37%
21	-0,002037598	-0,001332573	0,37%
22	0,001264398	-0,002396875	0,38%
23	0,002941593	0,001179685	0,45%
24	-0,001501723	0,002730271	0,38%
25	-0,002271678	-0,001139593	0,36%

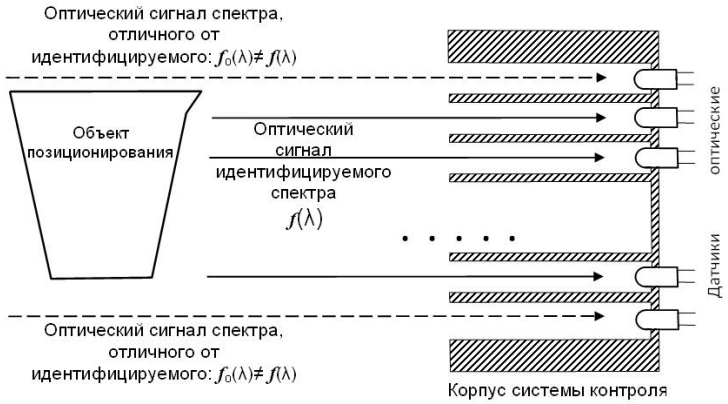


Рис. 5. Схема дистанционного контроля положения заливочного ковша

Контроль основан на регистрации излучения поверхности расплавленного металла по спектральной характеристике и управлении полученной информацией световым табло – линейкой светодиодов [8-10]. Датчики, наиболее чувствительные к спектру излучения расплавленного металла размещаются на высоте требуемого положения ковша при заливке из него расплава в стопки заливочных форм – на высоте 200 мм от кромки воронки

верхней стопки, что обеспечивает контроль высоты струи в диапазоне 200-250 мм. В горизонтальной плоскости оптимальное расстояние крепления устройство дистанционного контроля от ковша составляет 300-400 мм. При меньшем расстоянии возникает опасность попадания брызг расплавленного металла с температурой 1430ºС на датчики. При большем расстоянии снижается чувствительность системы контроля. Светодиоды индикации расположены на той же панели. Дискретность расположения датчиков и индикаторов по высоте составляет 20 мм, что вполне достаточно для позиционирования ковша на высоте 200-250 мм от стопки заливочных форм.

Рассчитана экономическая эффективность инновационной системы контроля розлива металла требованиям качества. По сравнению с органолептическим контролем положения ковша и управления его позиционированием автоматизированный контроль обеспечивает снижение потерь от нарушения целостности форм, а соответственно – снижение числа бракованных заготовок. Для программ производства спектра выпускаемых ОАО «Ставропольский завод поршневых колец – СТАПРИ» колец экономический эффект составляет 100000 руб. в год для наименее металлоемких изделий и 1000000 руб. в год для наиболее металлоемких.

Заключение. В системе контроля и управления качеством производства поршневых колец разработана и практически реализована инновационная технология дистанционного контроля положения заливочного ковша, основанная на формализации представления спектра его отражения линейной функцией и рядом Фурье. Это позволило на практике сократить число параметров, характеризующих объект контроля и датчики, обеспечить метрологический класс точности представления спектральных характеристик, и стабильность параметров заливки металла, а соответственно – характеристик изготавливаемой продукции, то есть повышение качества продукции. Снижение брака обеспечивает экономический эффект от 100000 до 1000000 руб. в год для изготавливаемых заводом «Стапри» поршневых колец.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. О некоторых критериях качества, используемых при компьютерном синтезе механизмов // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2012. – С. 48-52.
2. Маслов В.И., Арустамян А.И., Минаков В.Ф. WEB-сервисы в системе управления качеством машиностроительной продукции // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича

и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, – 2012. – С. 472–478.
3. Маслов В.И., Минаков В.Ф. Эластичность качества по цене и затратам // Стандарты и качество. – 2012. – № 9(903). – С. 88–90.
4. Маслов В.И., Минаков В.Ф. Критерий эффективности в системе управления качеством продукции предприятия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». – 2012. – № 6 (162). – С. 179 – 184.
5. Поршневые группы для автомобилей, сельхозтехники, тракторов. Производство и качество. [Электронный ресурс] // URL: http://konotop-porsh.net/quality.html (дата обращения: 15.03.2013).
6. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Исследование схемы дифракционного контроля положений объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – №1 (71). – С. 6-9.
7. Патент РФ на полезную модель № 69233. Устройство для контроля положения ковша с расплавленным металлом. Минаков В.Ф. и Арустамян А.И. Зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей РФ 10.12.2007 г. Приоритет от 25.04.2006 г.
8. Минаков В.Ф., Арустамян А.И. Технология контроля положения ковша при розливе металла // Вопросы материаловедения. – 2010. – №4 (64). – С. 72-78.
9. Маслов В.И., Арустамян А.И. Повышение качества производства поршневых колец. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». – 2012. – № 1 (142). – С. 132 – 136.
10. Маслов В.И., Арустамян А.И., Минаков В.Ф. Оптический контроль в системе управления качеством производства поршневых колец // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 16–20.

УДК 664.3.033.6

В.И.Маслов, Е.А.Елисеева

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛИВОЧНОГО МАСЛА



Владимир Иванович Маслов, д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой конструкторско-технологических инноваций
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия Тел.: (812)-534-0764, E-mail: ukti@spbstu.ru



Наталья Анатольевна Елисеева, соискатель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: (812)-534-0764, E-mail: elisnataly@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрена задача обеспечения требований безопасности и качества сливочного масла при управлении процессами его производства на ОАО «Псковский городской молочный завод». Решение задачи проведено на базе использования принципов системы ХАССП, основанной на поиске и управлении критическими контрольными точками (ККТ). Проведен анализ операций технологического процесса производства сливочного масла и установлено, что наиболее критическим параметром является температура пастеризации, для которой определено её оптимальное значение, подлежащее приоритетному управлению.

Ключевые слова: нормативные показатели безопасности сливочного масла, требования к характеристикам безопасности, система ХАССП, критические операции технологического процесса производства масла, показатели качества масла, критический диапазон температур пастеризации.

THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF ENSURING SAFETY AND QUALITY OF BUTTER

Dr. Vladimir I. Maslov[1], e-mail: ukti@spbstu.ru;
N.F.Jelisejeva[1], e-mail: elisnataly@yandex.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

The paper considers the task of ensuring the safety and quality indicators of butter during the control of production processes in “Pskov City Dairy Plant”. Solution of the problem was carried out on the basis of the principles of the HACCP system, based on the search and management of critical control points (CCPs). The analysis of the operations of the technological process of butter was carried out and was found that the most critical parameter is the temperature of pasteurization for which is defined its optimal value - subject to priority control.

Keywords: normative indicator of butters safety, performance requirements for safety, HACCP system, the critical operations of the technological process of butter production, butter quality, the critical temperature range of pasteurization.

Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 года [5], формирует основные цели государственной политики в области здорового питания - сохранение и укрепление здоровья населения, профилактика заболеваний, обусловленных неполноценным и несбалансированным питанием. При этом главное внимание обращается на качество пищевых продуктов и их соответствие медико-биологическим требованиям.

ОАО «Псковский городской молочный завод» подготавливает внедрение системы управления безопасностью пищевых продуктов (англ. HACCP - Hazard Analysis and Critical Control Points - анализ опасностей и критические точки контроля), обеспечивающей контроль на всех этапах производства пищевых продуктов, в любой точке процессов производства, хранения и реализации продукции, где могут возникнуть опасные ситуации. При внедрении системы HACCP особое внимание должно быть обращено на критические контрольные точки (ККТ), в которых все виды рисков, связанных с употреблением пищевых продуктов, могут быть предотвращены, устранены и снижены до приемлемого уровня в результате целенаправленных мер контроля.

Требования к характеристикам, обеспечивающим безопасность продукта, определены национальным стандартом РФ ГОСТ 52969—2008 «Масло сливочное. Технические условия». Нормативные требования к показателям безопасности представлены в таблице 1.

Общая бактериальная обсемененность (КМАФАнМ) - количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в 1 г или 1 $см^3$ продукта.

Наличие бактерий группы кишечной палочки (БГКП) наблюдается во всех молочных продуктах (за исключением стерилизованных).

Стафилококк золотистый (*S.aureus*) -бактерия рода стафилококк.

Сальмонелла энтерика (или сальмонелла кишечная, лат. salmonella enterica) - вид бактерий из рода сальмонеллы.

Таблица 1. Нормативные требования к показателям безопасности сливочного масла

Наименование показателя	Норма для масла
Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ), КОЕ/г, не более	$1x10^5$
Масса продукта, г, в которой не допускаются: БГКП (колиформы) S.aureus Патогенные, в том числе сальмонеллы L.monocytogenes	 0,01 0,1 25 25
Плесневые грибы, КОЕ/г, не более	100 в сумме
Дрожжи, КОЕ/г, не более	

Листерия (лат. *Listeria*) - род палочковидных бактерий.

На ОАО «Псковский городской молочный завод» сливочное масло выпускается на автоматизированной линии по отработанному технологическому процессу методом преобразования высокожирных сливок.

Далее были рассмотрены операции технологического процесса производства сливочного масла методом преобразования высокожирных сливок. Схема технологического процесса представлена на рис. 1.

СХЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА МАСЛА МЕТОДОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВЖ СЛИВОК

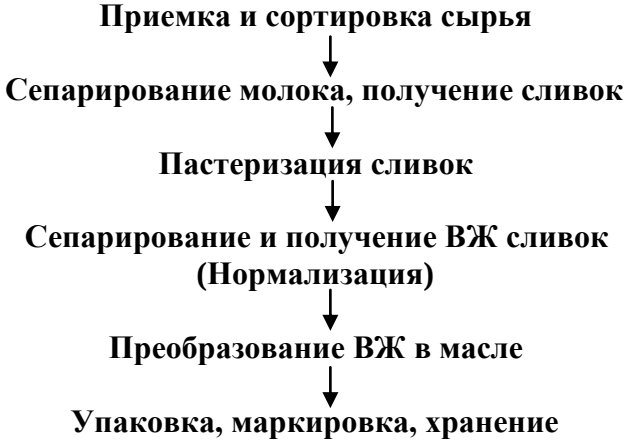


Рис. 1. Схема технологического процесса производства масла методом преобразования высокожирных сливок

Сепарирование молока и сортировка сливок - разделение молока на сливки и обезжиренное молоко. Осуществляется сепаратором. Сорт сырья определяет качество масла. На основании данных органолептической оценки и лабораторных исследований устанавливают качество сливок.

Пастеризация сливок – тепловая обработка, в процессе которой

уничтожаются микроорганизмы, инактивируются ферменты, сливки приобретают соответствующий вкус пастеризации и частично затушевываются нежелательные привкусы. Процесс пастеризации считается эффективным в том случае, если уничтожается 99,9% микроорганизмов, содержащихся в сливках. Помимо общепринятой цели пастеризации - уничтожения патогенной микрофлоры и снижения общей бактериальной обсемененности, в производстве сливочного масла она должна обеспечить решение задач инактивации ферментов, в частности, липазы, придания специфического вкуса и аромата пастеризации, маскирования нежелательных привкусов и запахов.

На выбор режима пастеризации оказывают влияние вид вырабатываемого масла, качество исходных сливок, время года, массовая доля жира в сливках. При выработке сладкосливочного масла, производимого на «Псковском городском молочного завода» температура пастеризации устанавливается в пределах 85-95 °С. При переработке сливок 2-го сорта температура пастеризации выше, чем для 1-го сорта. Это связано с повышенной бактериальной обсемененностью сырья или с наличием слабого кормового привкуса в нем. Температура пастеризации сливок, имеющих слабовыраженные посторонние привкусы и запахи, но хорошую устойчивость белков к коагуляции, находится в пределах 100-115 °С [4]. Поскольку жир обладает низкой теплопроводностью, то увеличение массовой доли его в сливках требует некоторого повышения температуры пастеризации.

При нагревании сливок в них образуется значительное количество вкусовых и ароматических веществ, отсутствующих в сырых сливках и придающих продукту характерный вкус и аромат пастеризации. Основными веществами, участвующими в формировании вкуса и аромата пастеризации, являются белки сливок, из которых образуются свободные аминокислоты, летучие жирные кислоты, их эфиры, свободные сульфгидрильные соединения типа SH - групп, лактоны, карбонильные соединения.

Получение и нормализация высокожирных сливок - повторное сепарирование, в результате которого получаются высокожирные сливки. Если содержание влаги после сепарирования ниже стандартного (16%) осуществляется нормализация высокожирных сливок – добавление пахты.

Охлаждение высокожирных сливок и получение масла - интенсивное охлаждение и перемешивание высокожирных сливок в маслообразователе.

После изучений технологического процесса производства и существующих методик по выявлению критических точек была разработана собственная методика, наиболее подходящая для данного предприятия, в соответствии с которой были определены ККТ на различных стадиях и построен «дом качества» технологического процесса технологического процесса производства сливочного масла.

Далее был произведен анализ полученных результатов. В процессе анализа были исключены операции, технологические параметры которых не оказывают влияние на показатели безопасности продукта и те опасные факторы, которыми нет возможности управлять с помощью изменения параметров технологического процесса.

В результате для дальнейшего рассмотрения получены данные таблицы 2, строки которой представляют стадии технологического процесса, а столбцы – опасные факторы. На пересечении строк и столбцов внесены коэффициенты 1 в случае признания экспертами опасного фактора рассматриваемой стадии технологического процесса ККТ. Расчет сумм по столбцам таблицы позволил определить значимость влияния операции технологического процесса на безопасность продукта. Расчет сумм строкам таблицы позволил оценить силу влияния технологического процесса на каждый показатель безопасности.

Таблица 2. Матрица влияния технологических операций на параметры безопасности

Опасный фактор	Пастеризация сливок	Сепарирование/Нормализация в/ж сливок	Преобразование в/ж сливок в масло	СУММА
КМАФАнМ	1	1	1	3
БГКП	1	1	1	3
Staphylococcus aureus	1			1
Listeria monocytogenes	1		1	2
СУММА	4	2	3	

Как видно из таблицы, операция пастеризации сливок оказывает наибольшее влияние на рассматриваемые опасные факторы. Технологическими параметрами операции являются температура и время. По результатам 10 циклов производства сливочного масла было произведено исследование технологических параметров пастеризации на наиболее управляемый показатель безопасности - КМАФАнМ. В таблице 3 представлены данные лабораторного контроля ОАО «Псковский городской молочный завод», использованные для оценки влияния температуры и времени пастеризации на относительное изменение показателя безопасности – КМАФАнМ, вычисленного по формуле:

$$\text{Относительное изменение КМАФАнМ} = \frac{\text{КМАФАнМ сливки} - \text{КМАФАнМ после пастеризации}}{\text{КМАФАнМ сливки}}\%$$

Таблица 3. Данные лабораторного контроля КМАФАнМ

Цикл	КМАФАнМ сливки	Температура пастеризации	Время пастеризации	КМАФАнМ после пастеризации	Относительное изменение КМАФАнМ
1	460000	101,0	8	350	99,92%
2	490000	100,5	10	390	99,92%
3	230000	102,5	10	140	99,94%
4	250000	103,0	10	100	99,96%
5	360000	102,0	8	240	99,93%
6	320000	104,0	8	100	99,93%
7	340000	104,0	8	100	99,97%
8	410000	104,0	10	110	99,97%
9	290000	102,5	8	90	99,97%
10	490000	104,5	10	50	99,99%

Оценка полученных результатов произведена в программе Statistica 6.0. Корреляционная матрица зависимостей относительного изменения КНАФАнМ от температуры и времени пастеризации представлена в таблице 4.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции

	Относительное изменение КНАФАнМ
Температура пастеризации	0,75
Время пастеризации	0,25

В результате статистического анализа было установлено, что температура пастеризации оказывает влияние на относительное изменение КМАФАнМ. Коэффициент корреляции r = 0,75. График рассеяния Температура пастеризации:Относительное изменение КНАФАнМ представлен на рисунке 2. Уравнение линейной регрессии

$$y = 0{,}985304202 + 0{,}00012605042*x$$

Время пастеризации практически не оказывает влияние на относительное изменение КМАФАнМ. Коэффициент корреляции r = 0,25.

Далее были рассмотрены показатели качества сливочного масла, также определенные в национальном стандарте РФ ГОСТ 52969—2008 «Масло сливочное. Технические условия». К показателям качества сливочного масла относятся органолептические показатели – вкус и запах, консистенция и внешний вид, цвет, упаковка и маркировка и химические показатели – массовая доля жира, массовая доля влаги. В стандарте приведена методика балльной оценки органолептических показателей масла (таблица 5).

В таблице 6 представлены данные лабораторного контроля показателей «Вкус и запах» и «Консистенция» для рассмотренных выше 10 циклов производства.

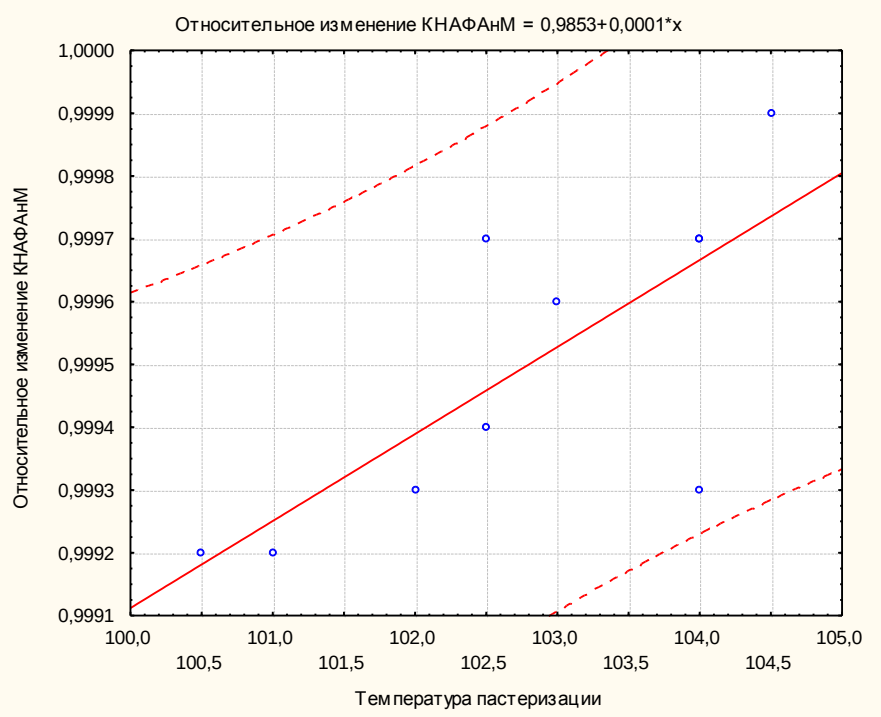


Рис. 2. График рассеяния (Температура пастеризации:Относительное изменение КНАФАнМ)

Таблица 5. Органолептические показатели качества сливочного масла

Наименование показателя	**Оценка (баллы)**
Вкус и запах	10
Консистенция и внешний вид	5
Цвет	2
Упаковка и маркировка	3
Итого	20

Таблица 6. Данные лабораторного контроля органолептических показателей

Сливки	Пастеризация		Масло	
Сорт	T^0	Время	Вкус и запах	Консистенция
1	101	8	10	5
1	100,5	10	10	5
1	102,5	10	10	5
1	103	10	9	5
1	102	8	10	5
1	104	8	9	5
1	104	8	9	4
1	104	10	9	4
1	102,5	8	10	5
1	104,5	10	9	5

Исследование влияния параметров технологических операций на органолептические показатели качества масла показало, что температура пастеризации оказывает значительное влияние на показатель «Вкус и запах» масла. Коэффициент корреляции r = -0,85. На показатель «Консистенция» масла температура пастеризации не оказывает столь существенного влияния. Коэффициент корреляции r = -0,47. Время пастеризации практически не влияет на показатели масла «Вкус и запах» и «Консистенция». Корреляционная матрица зависимостей органолептических показателей масла от температуры и времени пастеризации представлена в таблице 7.

Таблица 7.Корреляционная матрица зависимостей органолептических показателей от температуры и времени пастеризации

Параметр	Вкус	Консистенция
Темп паст	-0,85	-0,47
Время паст	-0,20	0,00

График рассеяния Температура пастеризации: Вкус представлен на рис. 3.

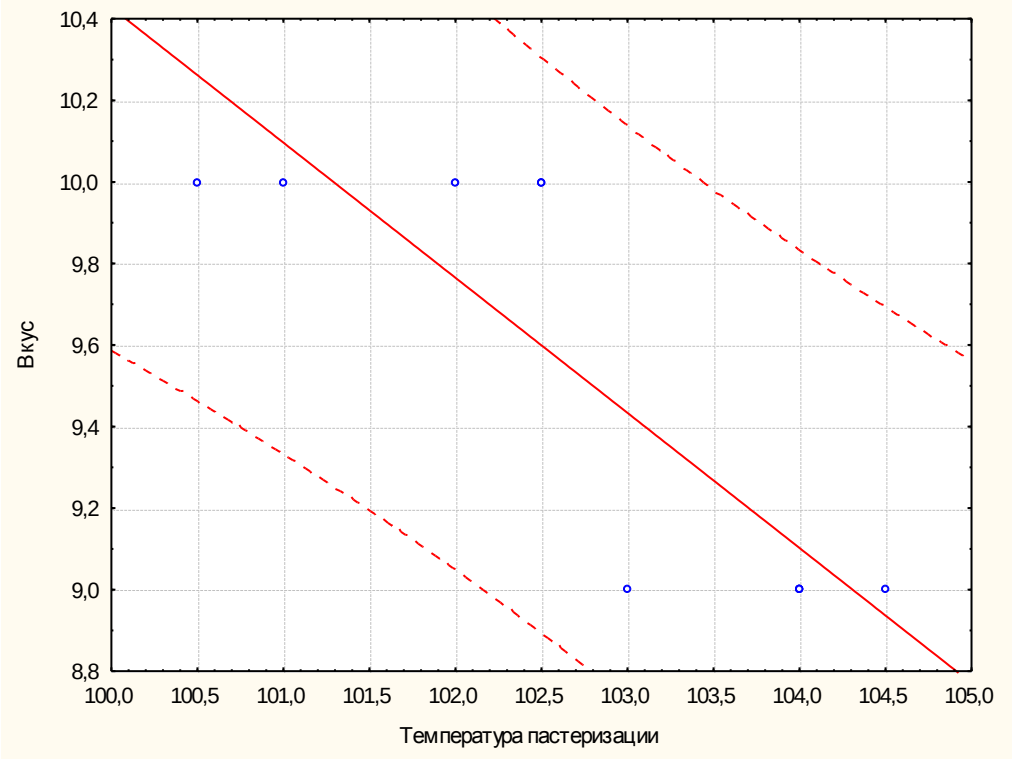


Рис. 3. График рассеяния (Температура пастеризации: Вкус)

Далее был произведен библиографический обзор и найдена публикация Котовой О.Г. [3] с положительной оценкой результатов повышения температуры пастеризации сливок свыше 100°С в производстве сладко-

сливочного масла на заводах России и за рубежом. В выводах статьи указано, что в производстве масла повышенного качества необходимо использовать оптимально высокие температуры пастеризации, как оказывающие благоприятное влияние на органолептические и микробиологические показатели продукта. На ОАО «Псковский городской молочный завод» пастеризация осуществляется при температурах свыше 100°С. Анализ графика (см.рисунок 3) показал, что сильный перегрев отрицательно сказывается на вкусовых качествах масла. Для нахождения верхнего температурного предела были дополнительно рассмотрены 30 циклов производства.

Результаты лабораторного контроля были разбиты на 2 группы - циклы производства, в которых органолептическому показателю «Вкус и запах» присвоены оценки 9 и 10 баллов соответственно. Параметры распределения температуры пастеризации для каждой группы представлены в таблице 8, гистограммы распределения температуры пастеризации для каждой группы - на рис. 4.

Таблица 8. Параметры распределения температуры пастеризации для групп с оценками вкуса 9 и 10 баллов

	Температура пастеризации				
Вкус	Среднее значение $T_{ср}^{0}$	Доверительная граница -95%	Доверительная граница +95%	Число попаданий N	Стандартное отклонение σ
9	106,3750	105,6701	107,0799	16	1,322876
10	98,9643	97,2983	100,6303	14	2,885403
All Grps	102,9167	101,2986	104,5347	30	4,333278

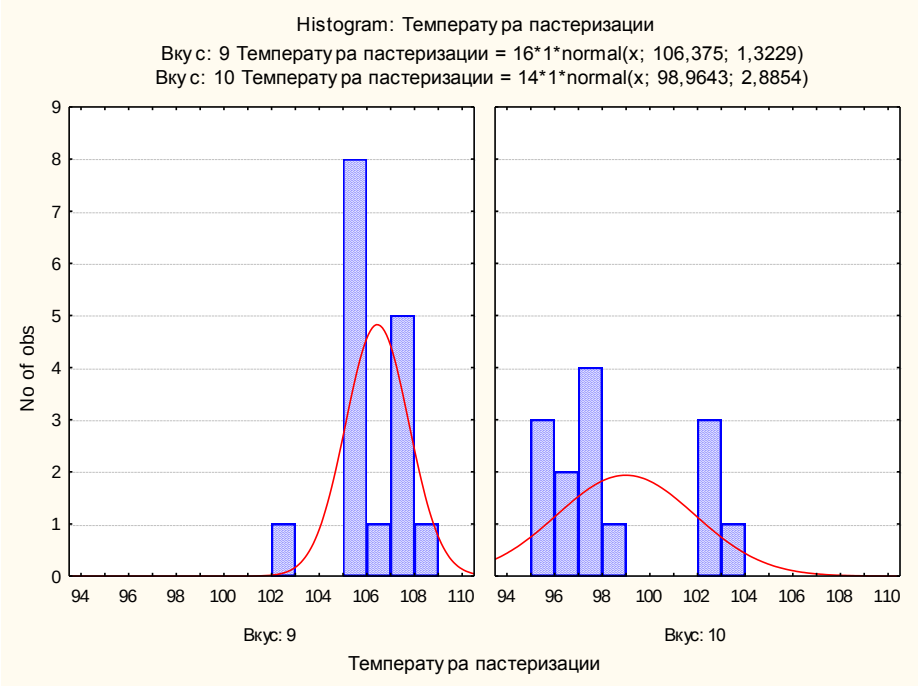


Рис. 4. Гистограммы распределения температуры пастеризации внутри групп

В таблице 9 приведены результаты однофакторного дисперсионного анализа, подтвердившего различие групп - F – статистика Фишера 19,38 больше F критическое, равное 4,96 при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$.

Таблица 9. Результат однофакторного дисперсионного анализа групп

	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	1835,416	1	1835,416	52309,34	0,000000
Температура пастеризации	6,800	10	0,680	19,38	0,000000
Error	0,667	19	0,035		

Таким образом, верхний предел температуры пастеризации, обеспечивающий присвоение органолептическому показателю масла «Вкус и запах» наивысший балл 10, составляет

$$T_{max} = T_{\text{ср}}^{0} + 3\sigma = 98{,}96\ ^{\circ}\text{C} + (2{,}89*3)^{0} = 107{,}6\ ^{\circ}\text{C}.$$

В случае превышения этой температуры масло приобретает пригорелый вкус и запах.

В результате рассмотрения требований стандарта ГОСТ 52969—2008 «Масло сливочное. Технические условия» к показателям безопасности и качества и произведенного статистического анализа технологических параметров процесса пастеризации сливок первого сорта был установлен диапазон температур, обеспечивающий наивысший показатель вкуса сливочного масла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л. А. Федоськина, А. Евстифейкина Система обеспечения безопасности пищевой продукции: проблемы внедрения пути их решения. Электронное периодическое научное издание "Системное управление" 2009, выпуск 1 (5).
2. ГОСТ 52969—2008 «Масло сливочное. Технические условия».
3. Котова О.Г. Повышение качества сливочного масла; Москва, Пищевая промышленность 1979 90с.
4. Цветкова Н.Д. Технология молока и молочных продуктов: Технология масла: курс лекций / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. - Кемерово, 2005. - 80 с.
5. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 апреля 2012 г. № 559-р «Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 года».
6. ГОСТ Р 51705.1-2001 Управление качеством пищевых продуктов на основе принципов ХАССП.

7. Цветкова Н.Д. Технология молока и молочных продуктов: Технология масла: курс лекций / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. - Кемерово, 2005. - 80 с.
8. Г.В.Твердохлеб, Г.Ю. Сажинов, Р.И.Раманаускас. Технология молока и молочных продуктов – М.:ДеЛи принт, 2006. – 616 с.
9. Елисеева Н.А. Разработка методики количественной оценки и управление качеством производственного процесса. Вестник «ИНЖЕКОНа» № 7 (34), серия "Экономика", 2009 – 356с. 220-224с.
10. Елисеева Н.А. Оценка качества продукции на примере предприятия ОАО «Псковхлеб». Вестник «ИНЖЕКОНа» № 8 (35), серия "Технические науки", 2009 -148 с. 120-123с.
11. Седлер М.И. Статистические методы в управлении качеством [Электронный ресурс] : учебное пособие / М.И. Седлер, М.Х. Седлер ; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра конструкторско-технологических инноваций .— Электрон. текстовые дан. (1 файл : 5,25 Мб) .— Санкт-Петербург, 2013.

УДК 664.314

В.И.Маслов, М.И.Седлер, Е.А.Елисеева

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ВЫЯВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК И ПОСТРОЕНИЯ «ДОМА КАЧЕСТВА» ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СЛИВОЧНОГО МАСЛА



Владимир Иванович Маслов, д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой конструкторско-технологических инноваций
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)-534-0764, E-mail: ukti@spbstu.ru



Мария Ильинична Седлер, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)-534-0764, E-mail: msedler@mail.ru



Наталья Анатольевна Елисеева, соискатель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)-534-0764, E-mail: elisnataly@yandex.ru

Аннотация

В работе рассматриваются основные положения системы ХАССР (НАССР) – анализ рисков и критических контрольных точек, используемой в настоящее время в основном для обеспечения безопасности производимых продуктов питания. Особое внимание обращено на выявление критических контрольных точек (ККТ), управление показателями которых могут быть предотвращены риски, связанные с появлением некачественной продукции. В частности, ККТ были определены при исследовании процессов производства на предприятии ОАО «Псковский городской молочный завод». Полученные данные были использованы для построения «дома качества» технологического процесса производства сливочного масла.

Ключевые слова: система ХАССР, критические контрольные точки (ККТ), выявление ККТ технологического процесса производства сливочного масла, «дом качества» процессов.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR IDENTIFYING CRITICAL CONTROL POINTS AND CONSTRUCTION A "HOUSE OF QUALITY" FOR THE UTTERS PRODUCTION PROCESS

Dr. Prof. Vladimir I. Maslov[1], e-mail: ukti@spbstu.ru;
M.I.Sedler[1], e-mail: msedler@mail.ru;
N.F.Jelisejeva[1], e-mail: elisnataly@yandex.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

This paper provides fundamentals of the system HACCP - Analysis and Critical Control Points, currently used primarily for the safety of manufactured foods. Special attention is paid to the identification of critical control points (CCPs) by, parameters control of which the risks associated with the emergence of low-quality products can be prevented. In particular, the CCP were identified in the study of the processes of production at JSC "Pskov City Dairy Plant". These data were used to construct a "house of quality" production process of butter.

Key words: HASSP, critical control points (CCPs), revealing CCP of butter production process, "house of quality" of processes.

Для современной пищевой промышленности характерно использование большого разнообразия сырья, ингредиентов и пищевых добавок, упаковочных и контактирующих с продукцией материалов, новых технологических решений. Анализ ситуации показывает, что для выпуска гарантированно безопасной и качественной продукции необходим целостный системный подход. Производство, переработка и другие операции с пищевыми продуктами должны быть проанализированы с целью оценки рисков.

В соответствии с системой ХАССП (HACCP – Hazard analysis and critical control points – анализ рисков и критических контрольных точек) для пищевой продукции существует три типа рисков:

– микробиологические риски. Существенными рисками для многих пищевых продуктов могут быть патогенны (болезнетворные микроорганизмы) и микробные токсины. Некоторые компоненты и/или готовые продукты потенциально содержат патогенны или представляют собой среду для развития микробных токсинов, которые могут вызвать серьезные заболевания, иногда со смертельным исходом. Реализованные микробиологические риски могут стать причиной хронических заболеваний;

– химические риски. Химические загрязняющие вещества в пищевой продукции могут быть либо естественного происхождения, либо образовываться в процессе обработки. Высокие уровни содержания вредных химических веществ служат причиной острого течения болезни, в то время как более низкие уровни приводят к хроническим заболеваниям. Понятие «потенциальные химические риски» включает микротоксины, антибиотики, пестициды и сульфиты;

- физические риски. Физическими рисками считаются любые объекты или материалы, которые являются частью изделия, но должны быть удалены из него, или не предназначены для того, чтобы быть частью изделия, но могут случайно попасть в него в процессе производства [4].

Метод анализа рисков и критических контрольных точек ХАССП — предупредительный, используемый в пищевой промышленности для обеспечения безопасности производимых продуктов питания.

Сущность метода состоит:

– в выявлении возможных факторов риска химического, физического и биологического происхождения при производстве продуктов;

– в анализе возникающих рисков;

– в определении контрольных точек, т. е. мест, в которых эти опасности можно и нужно выявить;

– в непрерывном контроле и регулировании всех параметров технологических процессов для предотвращения критических ситуаций, отрицательно влияющих на безопасность и качество готовой продукции [2].

Предупредительным данный метод является потому, что он направлен на предотвращение отрицательного влияния производимых предприятием продуктов питания на здоровье человека еще на стадии производства. Метод предполагает выявление критических контрольных точек, т. е. мест проведения контроля для идентификации опасных факторов на стадиях технологического процесса, а также разработку и реализацию предупреждающих и корректирующих действий для устранения этих факторов. В этом состоит принципиальное отличие метода ХАССП от традиционных методов, ориентированных на контроль готовой продукции [3].

Система ХАССП играет важную роль в мировом производстве продуктов питания. На основе этой системы в разных странах были разработаны национальные стандарты, содержащие требования к системам управления безопасностью продуктов питания. Использование этого метода является обязательным для предприятий пищевой промышленности в странах Европейского Союза, США и Канаде. Во многих странах Европы после выхода упомянутой директивы Совета ЕЭС № 93/43 были разработаны национальные стандарты на основе принципов ХАССП. Наиболее распространены следующие из них:

– голландский стандарт (разработан Голландским национальным комитетом экспертов НАССР) “Требования для системы управления безопасно-

стью продуктов питания на основе НАССР", сентябрь 2002 г.;

– датский стандарт БЗ 3027:2002 "Управление безопасностью продуктов питания на основе НАССР (анализ рисков и критические контрольные точки). Требования к системам управления для компаний, производящих пищевые продукты, и их поставщиков";

– "Технический стандарт и протоколы для компаний, поставляющих розничные продукты торговых марок", изд. 3, апрель 2002г., разработанный Британским консорциумом розничной торговли (BEC).

– Современная концепция управления качеством пищевой продукции исходит из того положения, что контроль качества и безопасности должен осуществляться в ходе производственного процесса, а не по его окончанию. Данной концепции, в полной мере, отвечает система НАССР, основанная на принципах обязательного обеспечения безопасности. [1].

К основным документам, обеспечивающим безопасность пищевой продукции, относятся:

- программы обязательных предварительных мероприятий;
- производственные программы обязательных предварительных мероприятий;
- план НАССР [4].

Форма и уровень требований обязательных предварительных программ могут меняться в зависимости от специфики производства. Одна и та же процедура может оказаться необходимой в одном секторе и необязательной в другом. Точно так же как критические контрольные точки, которые устанавливаются для контроля более серьезных рисков, чем риски, регулируемые обязательными предварительными программами, меняются в зависимости от конкретного сектора пищевой промышленности.

Для внедрения системы ХАССП производители обязаны не только исследовать свой собственный продукт и методы производства, но и применять эту систему и ее требования к поставщикам сырья, вспомогательным материалам, а также системе оптовой и розничной торговли. При этом особое внимание стоить обратить на критические точки контроля, в которых все виды рисков, связанных с употреблением некачественных пищевых продуктов, могут быть предотвращены, устранены и снижены в результате целенаправленных мер контроля. Таким образом, внедрение системы ХАССП на предприятиях пищевой промышленности предполагает определение критических точек.

Маслоделие имеет ряд особенностей, которые делают сливочное масло опасным с точки зрения микробиологических рисков. Основной риск связан с низкой температурой пастеризации сливок.

В связи с особенностями производства сливочного масла можно выделить основные критические точки, в которых микробиологические риски наиболее значимы: молоко – сырье; пастеризация; фасование; хранение.

Исходя из вышеизложенного, проблема определения критических контрольных точек (ККТ) на различных стадиях производства сливочного масла, является актуальной.

В ходе работы на предприятии ОАО «Псковский городской молочный завод» были определены основные положения управления качеством пищевой продукции: обеспечение безопасности; анализ рисков и критических контрольных точек; контроль качества технологических процессов.

На первом этапе исследований была собрана исходная информация о продукции. В настоящий момент сливочное масло выпускается на автоматизированной линии по отработанному технологическому процессу методом преобразования высокожирных сливок, включающему: приемку молока, охлаждение, хранение, подогревание, сепарирование, тепловую обработку, получение высокожирных сливок, термомеханическую обработку сливок, фасование и термостатирование масла, хранение масла.

На втором этапе исследований после изучения существующих методик по выявлению критических точек была разработана собственная методика определения ККТ, наиболее подходящая для данного предприятия.

В основе методики лежит диаграмма, представленная на рисунке 1, в которой отражается два параметра: тяжесть последствий и вероятность реализации опасного фактора, на основании которых выясняется, является ли точка критической (попавшей в область недопустимого риска).

Выявление ККТ осуществляется по следующему алгоритму:

- на первом шаге собирается полная информация о продукте и процессе, и выявляются опасные факторы.

- на втором шаге осуществляется оценка вероятности реализации каждого опасного фактора (таблица 1). Последующие действия заключаются в присвоении оценки тяжести последствий от присутствия в продукции выявленных опасных факторов. Тяжесть последствий также оценивается в баллах согласно критериям, приведенным в таблице 2. Присвоение данной оценки проводится путем экспертной оценки тяжести последствий всех выявленных опасных факторов: физических, химических и биологических.

- на третьем этапе исследований осуществляется анализ рисков путем позиционирования точек на диаграмме анализа рисков, а также произведена апробация методики - выявлены ККТ технологического процесса производства сливочного масла путем простановки баллов экспертами каждому опасному фактору. В качестве экспертов выступили директор по качеству, заместитель директора по качеству и главный технолог предприятия.

После обработки полученных результатов были определены ККТ этапов технологического процесса производства сливочного масла: микробиологические показатели сырья; химические показатели сырья; микротоксины; количество соматических клеток; пестициды; микробиологиче-

ское заражение со стороны персонала; физические опасности, связанные с персоналом.

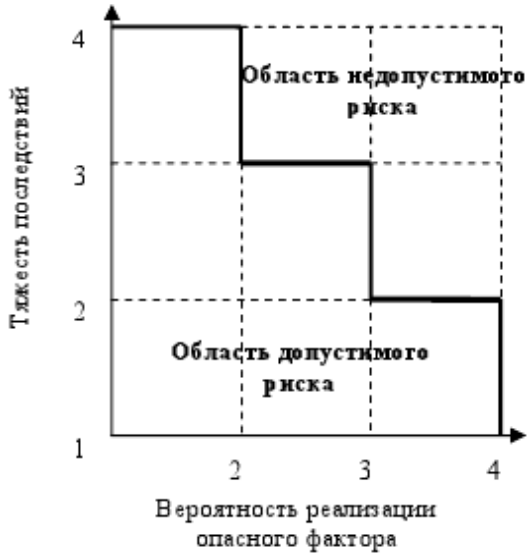


Рис. 1. Диаграмма анализа рисков

Таблица 1. Оценка вероятности реализации опасного фактора

Вероятность проявления опасного фактора	Оценка вероятности, балл
Практически отсутствует	1
Малая	2
Значительная	3
Высокая	4

Таблица 2. Оценки тяжести последствий от присутствия опасного фактора

Уровень опасности	Оценка вероятности, балл
Слабый (действие опасного фактора не приводит к потере работоспособности)	1
Средний (потеря работоспособности в течение нескольких дней без последующего проявления последствий)	2
Тяжелый (длительная потеря трудоспособности, получение инвалидности 3 группы)	3
Критический (получение инвалидности 1 или 2 групп, летальный исход)	4

На четвертом этапе исследования была разработана пошаговая модель построения «дом качества» технологического процесса производства сливочного масла (рис. 2).

Шаг 1. Список показателей безопасности продукта (столбец 1).

Шаг 2. Операции технологического процесса (строка 2).

Шаг 3. Матрица зависимостей показателей безопасности продукта и операций технологического процесса (таблица 3). Этот этап осуществляется с целью получить ответ на вопрос: как связаны выявленные ККТ с опе-

рациями технологического процесса. Для этого строится центральная часть дома. В случае наличия связи ячейку таблицы вносится коэффициент 1, в случае отсутствия связи – ячейка таблицы остается пустой.

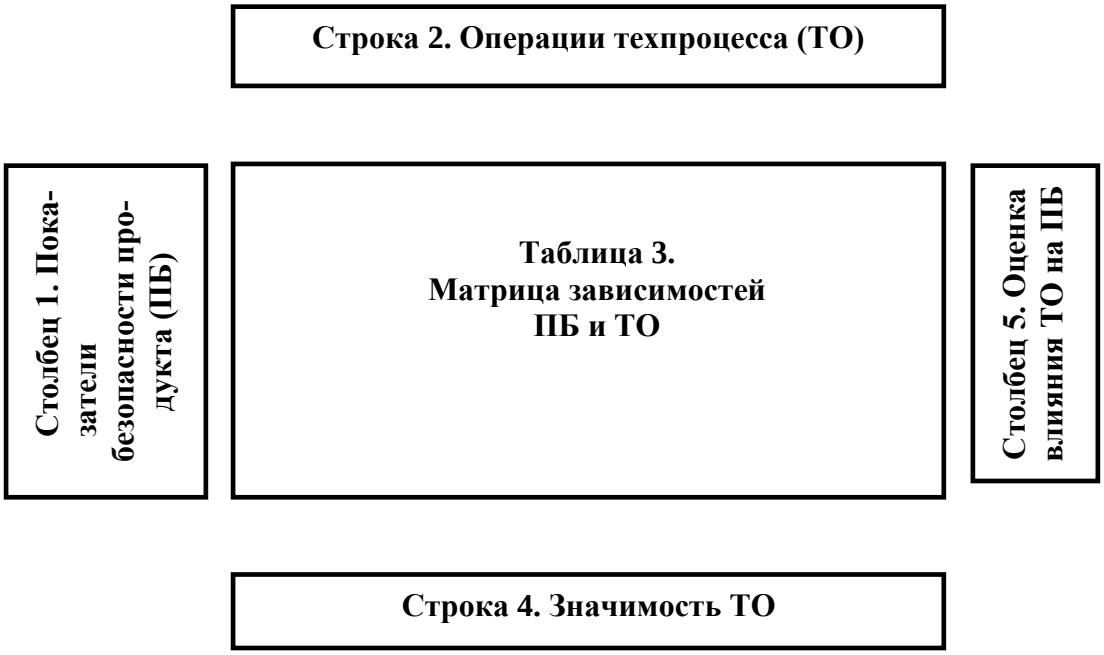


Рис. 2. «Дом качества» технологического процесса

Шаг 4. Оценка значимости операций технологического процесса (строка 4). Этот этап осуществляется с целью выявления операций технологического процесса, требующих контроля. Для этого рассчитываются суммы по столбцам таблицы. Дальнейшего рассмотрения требуют те операции, для которых вычисленная сумма больше 0.

Шаг 5. Оценка влияния операций технологического процесса на показатели безопасности продукта (столбец 5). Этот этап осуществляется с целью оценки степени влияния технологического процесса на показатели безопасности продукта. Для этого рассчитываются суммы по строкам таблицы. Дальнейшего рассмотрения требуют показатели безопасности, для которых вычисленная сумма больше 0.

На пятом этапе исследования в соответствии с разработанной моделью построен «дом качества» технологического процесса производства сливочного масла (таблица 3). Строки таблицы - стадии технологического процесса производства сливочного масла, столбцы – опасные факторы. Для всех выявленных ККТ стадий технологического процесса в таблицу внесены коэффициенты 1. Расчет сумм по столбцам таблицы позволил определить операции технологического процесса, оказывающие влияние на безопасность продукта. Расчет сумм строкам таблицы позволил оценить силу влияния технологического процесса на каждый показатель безопасности.

Таблица 3. «Дом качества» технологического процесса производства сливочного масла

Опасный фактор	Приемка молока	Резервирование молока	Пастеризация сливок	Нормализация в/ж сливок	Преобразование в/ж сливок в масло	Фасование	Хранение	СУММА
КМАФАнМ	1		1	1	1	1		5
БГКП			1	1	1	1		4
Патогенные, в том числе Salmonella	1					1		2
Staphylococcus aureus	1		1			1		3
Listeria monocytogenes	1		1		1	1		4
Психротрофные микроорганизмы (pseudomonas, дрожжи, плесневые грибы, микрококки)	1					1	1	3
Ингибирующие вещества (остаточные количества моющих и дез.средств)	1							1
Токсичные элементы (тяжелые металлы)	1					1		2
Антибиотики	1							1
Радионуклиды	1					1		2
Пестициды	1					1		4
Микотоксины	1							1
Элементы моющих средств	1	1	1		1	1		5
загрязнение смазочными материалами	1					1		2
Химические опасности связанные с упаковочными материалами						1		1
Нефтепродукты	1				1	1		3
Физические опасности поступающие из окружающей среды	1				1	1		3
Птицы, грызуны, насекомые и отходы их жизнедеятельности						1	1	2
Элементы технологического оснащения, продукты износа машин и оборудования, инвентаря.	1				1	1		3
Личные вещи, элементы жизнедеятельности персонала	1				1	1		3
СУММА	17	1	6	2	9	17	2	

На шестом этапе исследования был произведен анализ полученных результатов. В процессе анализа были исключены те операции, технологические параметры которых не оказывают влияние на показатели безопасности продукта и те опасные факторы, которыми нет возможности управлять с помощью изменения параметров технологического процесса.

Операции сепарирования молока, резервирования сливок и повторного сепарирования для получения высокожирных сливок не оказывают влияние на безопасность продукта, о чем свидетельствуют полученные суммы по столбцам, равные 0.

Проявление опасных факторов на операциях приемки молока, фасования и хранения связаны с организационными мероприятиями: лабораторный контроль сырья, обследование персонала, автоматизация, организация контроля и т.д.

Также с помощью организационных мероприятий решаются вопросы контроля элементов моющих средств, нефтепродуктов, физических опасностей, поступающих из окружающей среды при ненадлежащем контроле.

Реализация описанного процесса оказалась достаточно трудоемкой. Для снижения трудоемкости было разработано компьютерное приложение, включающее базу данных произведенных оценок, автоматизирующее процессы выявления ККТ и построения «дома качества» технологического процесса сливочного масла в соответствии с описанными методиками. В дальнейшем на основе автоматизированного приложения будет создана универсальная экспертная система для выявления КТК и построения «дома качества» технологических процессов производства ОАО «Псковский городской молочный завод».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубов И.И. Принципы внедрения международной системы качества и безопасности /И. И. Голубов // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2008. – № 6. – С. 32-35.
2. Михеева Е. Н. Управление качеством: Учебник / Е. Н. Михеева, М. В. Сероштан. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2012. — 532 с.
1. З.Небалуева Л. А. Система менеджмента безопасности: технология разработки / Л. А. Небалуева // Методы менеджмента качества. – 2005. – №8. – С. 23-25.
3. Принципы ХАССП. Безопасность продуктов питания и медицинского оборудования; пер с анг. О. В. Замятиной. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2006. – 232с., с.31-32.
4. Системный подход к решению проблем качества молочной продукции / Е. В. Шепелева // Мол. пром. – 2002. - №12. – с.34-36.
5. Системы управления качеством в молочной промышленности / С. Зайка, А. Тарчинска // Мол. пром. – 2004. - №6. – с. 21-22.
6. Цветкова Н.Д. Технология молока и молочных продуктов: Технология масла: курс лекций / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. - Кемерово, 2005. - 80 с.

7. Г.В.Твердохлеб Г.Ю. Сажинов, Р.И.Раманаускас. Технология молока и молочных продуктов – М.:ДеЛи принт, 2006. – 616 с.
8. ГОСТ 52969—2008 «Масло сливочное. Технические условия».
9. Елисеева Н.А. Разработка методики количественной оценки и управление качеством производственного процесса. Вестник «ИНЖЕКОНа» № 7 (34), серия "Экономика", 2009 – 356с. 220-224с.
10. Елисеева Н.А. Оценка качества продукции на примере предприятия ОАО «Псковхлеб». Вестник «ИНЖЕКОНа» № 8 (35), серия "Технические науки", 2009 -148 с. 120-123с.

УДК 004.655

В.И. Маслов, М.И. Седлер, В.А. Степанова

РАЗРАБОТКА PLM – СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ



Владимир Иванович Маслов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: (812) 534-0764, E-mail:ukti@spbstu.ru



Мария Ильинична Седлер, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: (812) 534-0764, E-mail: msedler@mail.ru



Валентина Андреевна Степанова, инженер 1 кат.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Т.: (812) 534-0764, E-il: stepanova.spbspu@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы повышения качества управления процессами подготовки научных статей к публикации. Для этого разработаны система внутренних и внешних статусов статей и модели процессов, которые смогут обеспечить учёт поступающих в редакцию материалов, а также автоматизированное приложение для реализации смоделированных процессов в сети Интернет. Внедрение системы повысит качество редакционной деятельности и конкурентоспособность журналов за счет сокращения сроков обработки материалов и оперативного предоставления авторам информации о статусе статей.

Ключевые слова: информационные системы, электронные документы, база данных, редакционная деятельность, доступ к информации, операторы информационных систем.

V.I.Maslov, M.I. Sedler, V.A. Stepanova

PLM-SYSTEM DEVELOPMENT OF PREPARATION SCIENTIFIC MANUSCRIPT FOR PUBLICATION

Dr. Vladimir I. Maslov[1], e-mail: ukti@spbstu.ru;
Maria I. Sedler[1], e-mail: msedler@mail.ru;
Valentina A. Stepanova[1], e-mail: stepanova.spbspu@yandex.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

This publication considers the questions of improving the quality management of process of scientific manuscripts preparation for publication.

For this purpose a system of status of manuscript and process models are developed. It is can ensure accounting documents in editorial office. Also automated application is developed for realization of these processes in the Internet. The system implementation improves the quality of editorial process and the competitive ability of journals by reduction the time of manuscript processing and a current provision of information for authors about the status of his manuscript.

Keywords: information systems, electronic documents, databases, editorial process, access to information, the operators of information systems.

В настоящее время важным аспектом издательской деятельности является повышение привлекательности издательств научных журналов для авторов и рецензентов.

Для повышения качества редакционно-издательского процесса создана автоматизированная система, представляющая собой интернет-сайт, обеспечивающая в режиме реального времени управление процессами регистрации авторов, рецензентов, взаимодействия авторов с секретарем редакции и членов редколлегии с рецензентами в процессе рецензирования через секретаря редакции. В состав системы входит база данных, в таблицах которой хранятся данные об авторах, рецензентах, статьях, статусах, и программные модули для автоматизации процессов:

– регистрации и последующей авторизации на сервере издательства авторов и рецензентов;

– отправки на сервер файлов, сопровождающих редакционный процесс (тексты статей, отзывы, договоры и т.д.);

– просмотра авторами статусов статей в процессе их подготовки к публикации;

– взаимодействия секретаря с авторами, членами редколлегии и рецензентами в процессе подготовки статей к публикации;

– учета присланных материалов.

На первом этапе разработки были изучены существующие процессы редакционно-издательской деятельности, создан алгоритм работы автоматизированной системы (рис. 1). Далее было осуществлено функциональное моделирование IDEF(0) процессов редакционной деятельности с использованием case-средства Bpwin [1].

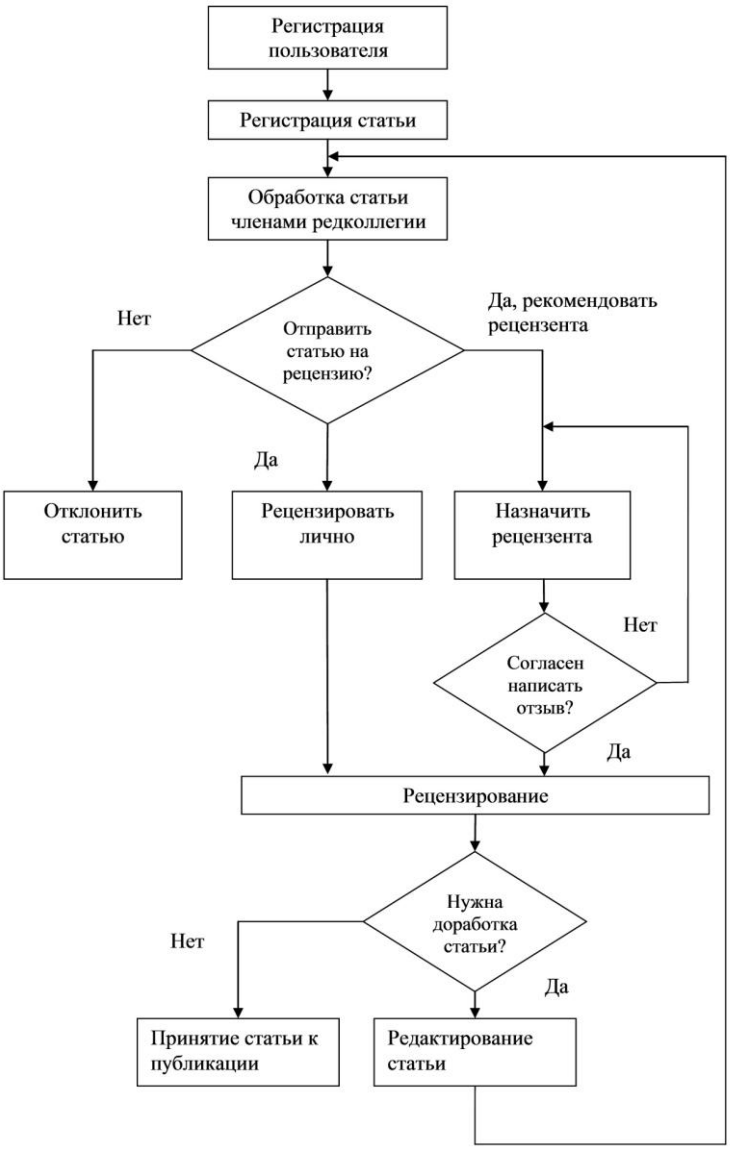


Рис. 1. Алгоритм работы системы

Автоматизированная система создана с использованием MySQL. Доступ к системе обработки запросов реализуется посредством языка PHP. Для придания разработанным web-страницам интерактивности встроены модули на основе JavaScript [2].

Так как любая редакция стремиться к привлечению и отечественных, и иностранных авторов, автоматизированная система имеет как русский, так и английский интерфейс. При открытии сайта следует выбрать язык отображения страниц. На сегодняшний день, английский язык, а именно так называемый «глобальный английский», является языком международного научного общения, и, следовательно, языком большинства научных публикаций. Пользователи, для которых английский язык не является родным, например, авторы статей из Китая, Индии, Пакистана, Германии, Эстонии и т.д. из-за многозначности терминологических единиц не всегда мо-

гут понять смысл размещенной на сайте информации, или найти смысловые неточности. В процессе разработки системы были устранены проблемы терминологического несоответствия, возникающего при переводе фраз на английский язык [3].

Участниками процесса подготовки научных статей к публикации являются авторы, технический секретарь редакции, члены редакционной коллегии, рецензенты.

Все участники процесса должны быть зарегистрированы в системе. Для этого требуется ввести в форму статус, персональные данные, логин и пароль. Система автоматически присваивает участнику ID, на основе которого строятся запросы к БД. Задача технического секретаря в этом процессе – просмотреть полученную заявку и подтвердить (отклонить) регистрацию.

Формы для авторизации и регистрации пользователя представлены на рис. 2.

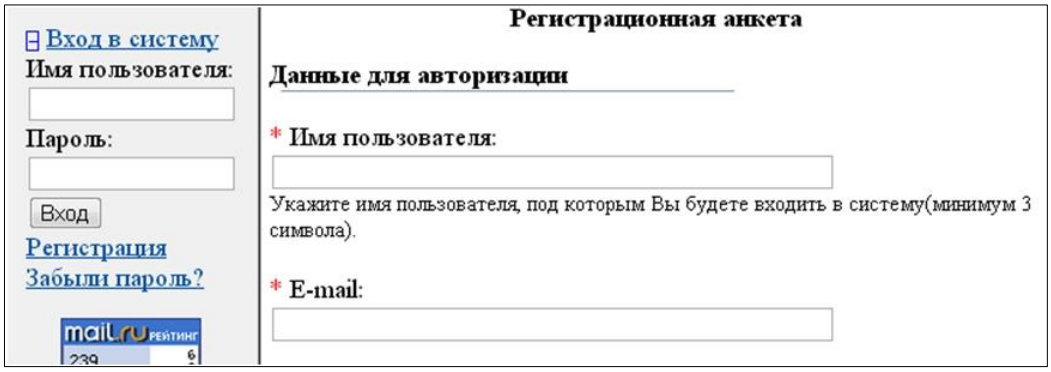


Рис. 2. Форма авторизации и регистрации пользователя

Для получения доступа к личному кабинету требуется авторизация пользователя. Авторы статей после получения права доступа к личному кабинету могут загружать файл (файлы) со статьёй на сервер редакции. При этом поступившая информация и статус «новая статья» записываются в таблицу базы данных; статье автоматически присваивается ID-номер.

Технический секретарь заходит в систему в качестве администратора. Он имеет расширенные права доступа к базе данных: возможность просмотра информации обо всех пользователях, скачивания присланных документов, отправки писем авторам, рецензентам, членам редакционной коллегии. Страница «Поступившие статьи» технического секретаря представлена на рис. 3.

Если автор загрузил файл со статьёй на сервер, у технического секретаря появляется соответствующее уведомление. Далее технический секретарь запрашивает в редакции номер для статьи. При этом на сайте отображается форма «Присвоить номер». Технический секретарь вводит полученный номер в специальное поле и нажимает кнопку «Применить». После

этого технический секретарь отправляет статью члену редакционной коллегии и пишет письмо – уведомление автору о том, что статья получена и зарегистрирована. Текст письма - уведомления автоматически генерируется на сайте с возможностью корректировки техническим секретарем. После корректировки письма – уведомления техническим секретарем, оно автоматически пересылается автору, а статус статьи меняется с «новая статья» на «статья зарегистрирована».

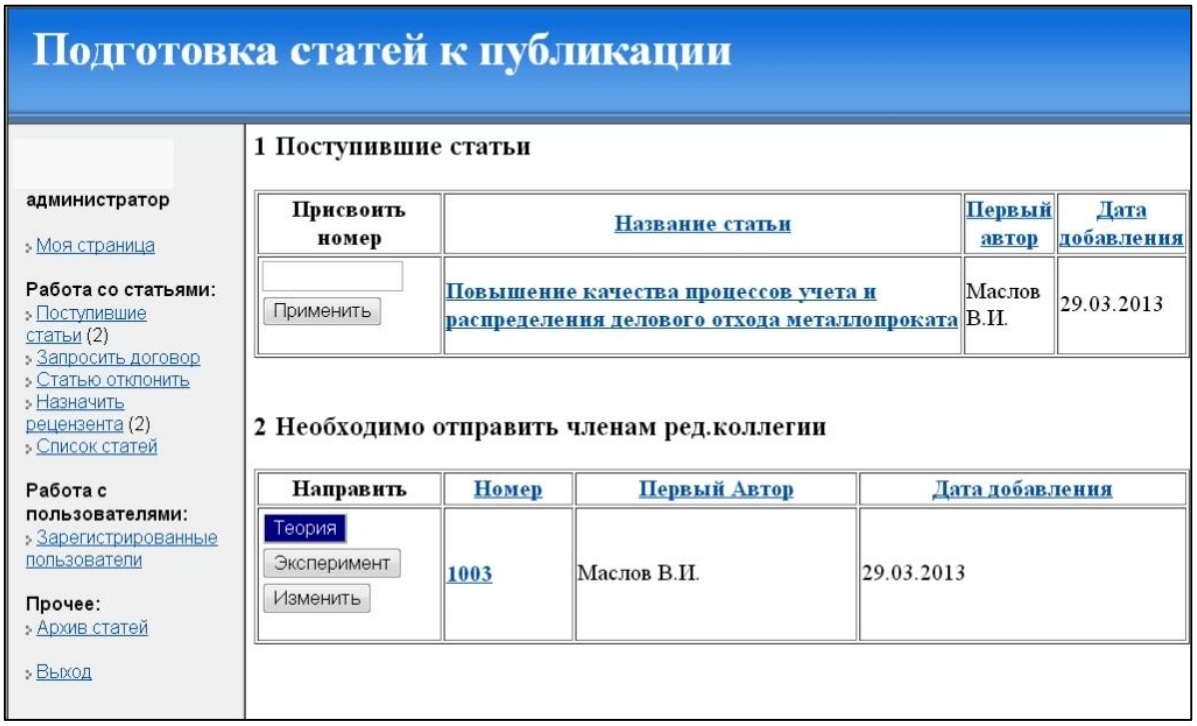


Рис. 3. Страница технического секретаря

Член редакционной коллегии получает письмо-уведомление о том, что поступила новая статья.

Если статья не может быть принята (не соответствует требованиям журнала), член редакционной коллегии пишет в появившемся поле ввода техническому секретарю, что статью надо отклонить с указанием причины отказа в публикации. Страница личного кабинета члена редакционной коллегии представлена на рис. 4.

Технический секретарь получает это уведомление, пишет письмо автору о том, что статья не принята; статус статьи автоматически получает новое название - «отклонено». Работа со статьей закончена.

Если член редакционной коллегии решает, что редактировать статью он будет лично, или статью можно сразу опубликовать, он отправляет техническому секретарю одно из указаний: «статью принять» и связаться с автором для заключения договора об авторских правах, или «рецензировать лично».

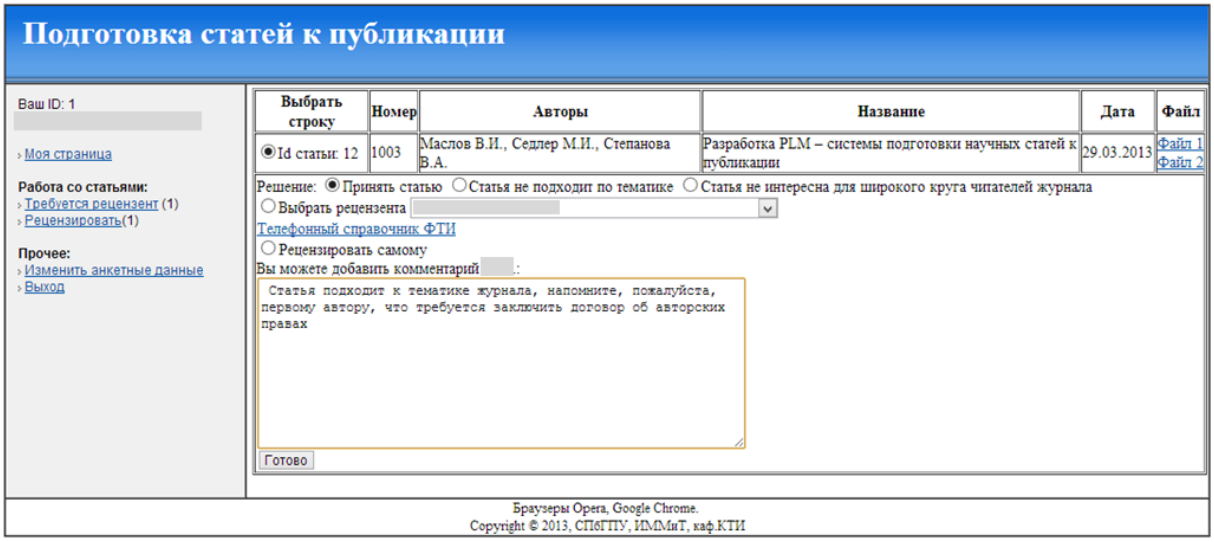


Рис. 4. Страница личного кабинета члена редакционной коллегии

Если технический секретарь получает от члена редакционной коллегии указание «статью принять», он уведомляет об этом автора. У автора появляется сообщение о необходимости заключения договора об авторских правах, после получения которого, технический секретарь файл (файлы) со статьёй отправляет научному редактору. Процесс подготовки статьи к публикации завершается.

В случае получения техническим секретарем от члена редакционной коллегии указания «рецензировать лично» начинается процесс рецензирования; статус статьи автоматически получает новое название - «на рецензии».

В процессе рецензирования член редакционной коллегии заполняет анкету и пишет замечания. Технический секретарь получает анкету и замечания, выполняет поступающие указания и, при необходимости, связывается с автором.

Если член редакционной коллегии решает назначить рецензента, он осуществляет поиск кандидата. Для поиска намеченного кандидата доступен список выбора, который формируется из базы данных зарегистрированных пользователей. Член редакционной коллегии направляет сообщение техническому секретарю.

Получив указание, технический секретарь открывает предполагаемому рецензенту доступ к файлу (файлам) со статьей. При этом статус статьи автоматически изменяется - «на рецензии»; в личном кабинете автора появляется соответствующая запись.

При входе в систему предполагаемый рецензент может ознакомиться с материалом статьи, после чего он должен принять решение о согласии на написание отзыва. Для этого в личном кабинете предполагаемого рецен-

зента предусмотрены две кнопки выбора.

Если предполагаемый рецензент соглашается написать отзыв на статью, он нажимает на кнопку «Принять»; ему открывается доступ к форме отправки замечаний и файла с рецензией техническому секретарю.

В случае если предполагаемый рецензент отказывается написать отзыв на статью, он нажимает на кнопку «Отклонить», переходит на новую страницу, на которой автоматически генерируется сообщение для технического секретаря с отказом от рецензирования. После нажатия на кнопку «Отправить» статус статьи меняется; предполагаемый рецензент больше не имеет доступа к статье. Техническому секретарю приходит сообщение от предполагаемого рецензента с отказом от рецензирования. Технический секретарь уведомляет ученого секретаря об отказе выбранного кандидата рецензировать статью. Процесс назначения рецензента повторяется.

После согласия предполагаемого рецензента написать отзыв, ему необходимо заполнить анкету, написать замечания, рецензию на статью и отправить эти материалы техническому секретарю.

Технический секретарь пересылает полученные замечания автору.

Автор вносит исправления и отправляет файл с новой редакцией статьи техническому секретарю.

Технический секретарь пересылает отредактированную статью члену редакционной коллегии и рецензенту. Член редакционной коллегии знакомится с материалом отредактированной статьи, с замечаниями рецензента, решает принять статью к публикации, о чем уведомляет технического секретаря, или решает назначить нового рецензента. В этом случае осуществляется процесс назначения рецензента.

В случае если технический секретарь получает от члена редакционной коллегии указание «статью принять», он уведомляет об этом автора; статус статьи меняется на «принято». У автора появляется сообщение о необходимости заключения договора об авторских правах. Файл (файлы) со статьёй отправляется научному редактору. Процесс подготовки статьи к публикации завершается.

Навигация между страницами сайта осуществляется с помощью кнопок, ссылок и меню, панели управления. Передача введенных пользователем параметров PHP-сценарию осуществляется с помощью HTML-форм, в которых используются списки выбора, зависимые и независимые переключатели, текстовые поля, слайдеры, всплывающие подсказки. Схема навигации по формам автоматизированной системы (карта сайта) представлена на рис. 5.

Участникам процесса и загруженным файлам статей в таблицах базы данных автоматически присваиваются идентификационные номера, на основе которых происходит построение связей, необходимых для формирования запросов. В зависимости от действий участников процесса статусы меняются автоматически.

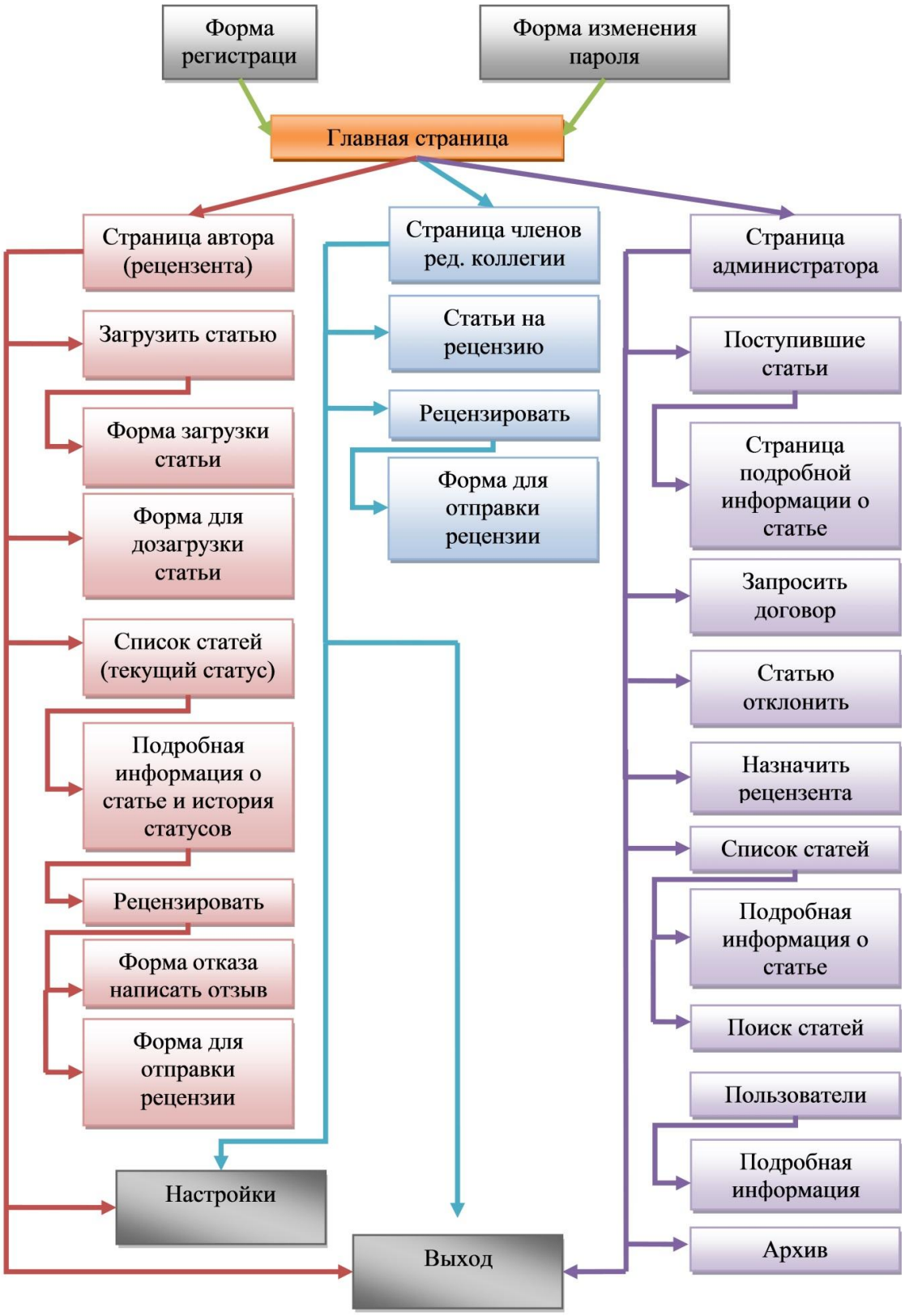


Рис. 5. Карта сайта

Если статус статьи не меняется более двух недель, соответствующая строка в таблице «Список статей» в личном кабинете технического секре-

таря выделяется красным цветом, если более семи дней – желтым.

Название загруженных статей на сервер записывается следующим образом: «Id_статьи-Id_пользователя-№ файла.формат файла». После присвоения статье персонального номера название файла меняется на «персональный номер статьи-№ файла.формат файла».

Кроме внутренних оповещений, предусмотрена отправка писем пользователям на указанные адреса электронной почты в случаях генерации нового пароля, регистрации, подтверждения (отказа) регистрации, предложения написать отзыв к статье.

Работа технического секретаря с другими участниками процесса строится на основе таблицы заданий. Все задания имеют свои идентификационные номера, даты начала и завершения, а также отметки об их выполнении.

При регистрации пользователя на сервера автоматически создается папка с его ID, в которой каждый раз создается папка с ID статьи, куда загружается статья и все сопроводительные материалы.

Статьи, с которыми закончена работа, в основном списке статей технического секретаря не отображаются. В БД они имеют отметку «stat_work=0», просмотреть их можно, нажав на вкладку «Архив статей».

Система поиска статей техническим секретарем осуществляется по персональному номеру или автору статьи.

Для апробации работы автоматизированной системы создан интернет – сайт (http://uktiedit.gixx.ru/) На сегодняшний день полностью реализованы процессы регистрации авторов и рецензентов, авторизации пользователей, регистрации статьи, обработки статьи членами редакционной коллегии, рецензирования статьи.

Внедрение приложения существенно упростит работу технического секретаря. В редакции меньше времени будет затрачиваться на организационные проблемы; процесс обработки статей ускорится, повысится качество их обработки, снизится риск утери материалов, возрастет привлекательность журнала. Авторы активнее станут присылать новые статьи, так как будут знать, что в любой момент смогут отслеживать процесс их подготовки к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Маслов В.И., Седлер М.И. Повышение качества управления процессами подготовки научных статей к публикации. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 159. С. 186-194.

2 Г.А. Самков. JQuery. Сборник рецептов. – 2-е изд., перераб. И доп. – Спб.: БХВ-Петербург, - 2011. – 416 с.: ил.+CD-ROM – (Профессиональное программирование).

3 В.А. Степанова, О.Н. Костерина. Problems of terminological inconsistencies in developing web interface system for preparation of scientific manuscripts for publication. Проблемы терминологического несоответствия при разработке англоязычного веб-интерфейса системы подготовки научных статей к публикации. XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. XX. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 24-25.

4 В.А. Степанова, М.И. Седлер, Н.А. Черкасова. Создание автоматизированной системы управления процессами регистрации авторов и подготовки статей к публикации. XL недели науки СПбГПУ : материалы международной научно-практической конференции. Ч.IV. – СПб. : Изд-во Потитех.ун-та, 2011. С.258.

5 В.А. Степанова, В.И. Маслов, М.И. Седлер. Решение проблемы повышения качества процесса подготовки научных статей к публикации. XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. IV. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 255-256.

6 РД IDEF0 - 2000. Методология функционального моделирования IDEF0.

7 Веллинг Люк, Томсон Лора. Разработка веб-приложений с помощью PHP и MySQL, 4-е изд.: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2010.- 848 с.: ил. – Парал. тит. англ.

8 Дари К., Бринзаре Б., Черчез-Тоза Ф., Бусика М. AJAX и PHP: разработка динамических веб-приложений. – СПб.: Символ-Плюс, 2006. – 336 с.

9 Д.Н. Колесниченко PHP 5/6 и MySQL Разработка Web-приложений. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.: ил.+CD-ROM – (Профессиональное программирование).

10 Кузнецов М. В., Симдянов И. В., Голышев С. В. PHP 5. Практика разработки Web-сайтов. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 960 с.

УДК 65.011.56

В.И. Маслов, Л.Н. Шуткевич

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ УЧЕТА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЛОВОГО ОТХОДА ЛИСТОВ МЕТАЛЛОПРОКАТА



Владимир Иванович Маслов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Т.: (812) 534-0764, E-mail:ukti@spbstu.ru



Людмила Николаевна Шуткевич, к.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Т.: (812) 534-0764, E-mail: lshutk@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы создания системы учета и распределения делового отхода листового материала для корпусообрабатывающего цеха кораблестроительного предприятия. Для этого разработана система маркирования, регистрации и адресного хранения, а также автоматизированное приложение для формирования штрих-кода, использующее информацию базы данных предприятия. Внедрение разработанной системы позволит значительно сократить время поиска делового отхода, исключить возможность ошибочного использования неподходящего материала и, как следствие, повысить качество изготовления корпусов судов.

Ключевые слова: листовой металлопрокат, деловой отход, процессы учета и распределения делового отхода, автоматизированное приложение для маркировки и учёта листов, специальный штрих-код, оборудование для маркировки и поиска делового отхода.

V.I.Maslov, L.N.Sutkevich

IMPROVING THE QUALITY OF ACCOUNTING AND DISTRIBUTION OF A SCRAP

Dr. Vladimir I. Maslov[1], e-mail: ukti@spbstu.ru
Dr.Ludmila N.Shutkevich[1], e-mail: ukti@spbstu.ru
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper deals with a creation system of accounting and distribution for a product sheet-material scrap for body-working shop of shipbuilding factory. For this purpose the system of marking, registration and address storage was developed. Also the automated application was developed for using database information of the company for bar code formation.

By the implementation of this system it is possible to reduce the time of search of product scrap, to exclude the possibility of using inappropriate materials and to increase the quality of manufacture of vessels bodies.

Key words: sheet metal, product scrap, process of accounting and distribution for a product sheet-material scrap, automated application for marking and accounting sheets, special bar-code, equipment for marking and search for a product scrap, improving the quality of accounting and distribution of scrap.

ВВЕДЕНИЕ

В состав технологической цепочки изготовления корпусов судов на судостроительном предприятии входит организация раскроя листового материала, который осуществляется оператором в автоматическом режиме.

В процессе раскроя листового металлопроката стандартных размеров образуется деловой отход, который нецелесообразно относить к металлолому – ввиду дороговизны некоторых марок стали, а также в целях более полного использования металла при изготовлении изделий. Поэтому деловой отход используется в производстве, как листовой металлопрокат нестандартных габаритов и формы. Параметры деловых отходов (длина, толщина, ширина, марка материала) наносятся промышленным маркером, после чего деловые отходы отправляют на склад хранения деловых отходов цеха, отдельно от мест складирования листового металлопроката стандартных размеров.

Параметры деловых отходов (длина, ширина, толщина, марка материала, № плавки) вносятся в базу данных с электронных карт раскроя в отдел подплазовой подготовки производства. Сами же деловые отходы хранятся в пачках бессистемно и без ведения складского учёта, что затрудняет поиск необходимого делового отхода.

При этом следует учесть то, что чаще всего геометрическая форма делового отхода не представляет собой прямоугольник. Как правило, деловой отход представляет собой лист с внутренними или внешними вырезами, площадь поверхности также варьируется. По причине ценности некоторых марок сталей, деловые отходы могут представлять собой совсем небольшие обрезки металла – поэтому складирование производится по единственному возможному при данных обстоятельствах принципу – более крупные листы остаются снизу, а листы с меньшей площадью поверхности укладываются в верхнюю часть стопы. Общая площадь складирования равняется приблизительно 1100 м^2, алгоритма складирования не существует – деловой отход произвольно размещается на свободных места площа-

дей складирования.

Для решения этой проблемы необходимо разработать систему учета и распределения делового отхода листового металлопроката, а также автоматизированная система, работающая с существующей на предприятии базой данных и учитывающая особенности судостроения и использования/получения делового отхода.

1 Разработка процесса учета и распределения

На предприятии существуют ведомости карт раскроя – файлы формата .xls, в которых приняты системы обозначений, однозначно определяющие характеристики каждого раскроя. На их основе можно разработать систему обозначений для делового отхода, комбинирующая в себе более четкую систему складирования отходов, их маркировку с помощью, например, этикеток (бирок) для четкого и однозначного поиска отходов по автоматизированной базе данных. Все это требует также установку соответствующего специального оборудования.

На рис. 1 представлена схема действия системы учета и распределения делового отхода.

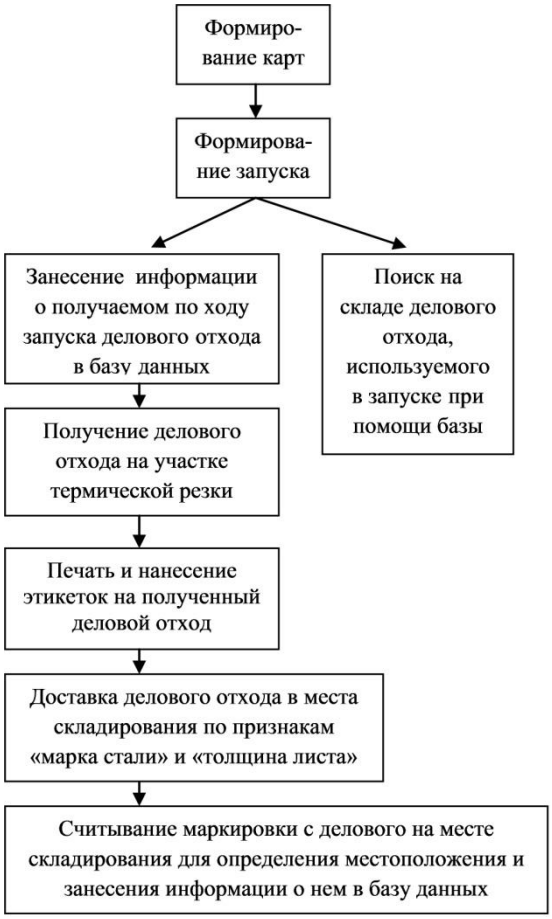


Рис. 1. Схема функционирования системы учета и распределения делового отхода

После формирования ведомости карт раскроя для текущего запуска необходимо автоматически внести данные о получаемом деловом отходе в таблицу делового отхода, распечатать бирки и промаркировать полученный деловой отход. Для этого в помещении кладовщика устанавливается соответствующее оборудование (ПЭВМ и принтер). После маркировки деловой отход помещается в места складирования.

Следует заметить, что на предприятии существуют трехмерные схемы помещений. Таким образом, при использовании перечисленного выше оборудования, появляется возможность определить месторасположение делового отхода после считывания маркировки в пространстве цеха, таким образом, решится проблема поиска необходимого делового отхода.

Что касается распределения делового отхода, то необходимо зонировать складские помещения по принципу толщины и марки стали – любые другие характеристики делового отхода систематизировать невозможно.

Вид этикетки-ярлыка представлен на рис. 2.

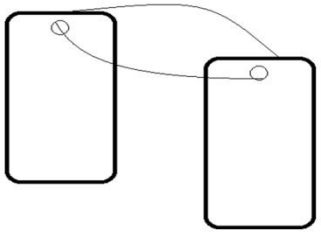


Рис. 2. Схематичное изображение бирки

Бирки представляют собой соединенные бечевкой (длина 300 мм) картонные прямоугольники (150х50 мм), один из которых обладает клеящейся поверхностью. Клеящая часть бирки присоединяется к лицевой стороне делового отхода, на второй ярлык приклеивается термотрансферная этикетка со штрих кодом.

Для автоматизации процесса учета и распределения делового отхода необходимо внести ряд изменений. Необходимо разработать приложение, заполняющее базу данных получаемого делового отхода, формирующего таблицу с информацией о получаемом деловом отходе для каждого запуска и создающее этикетку с уникальным штрих кодом, которую можно распечатать и нанести на деловой отход сразу после его образования.

Два незанятых в штрих коде разряда можно будет использовать для определения делового отхода в зону хранения (таким образом, количество зон может равняться 100). При размещении делового отхода на складе, каждой единице складирования присваивается определенный адрес, соответствующий месту хранения, исходя из чего, всегда можно определить его месторасположение - при считывании штрих кода с делового отхода с терминала сбора данных сигнал через антенну подается на компьютер, и фиксируется положение делового отхода с точностью 1 – 4 метра.

Адресное хранение подразумевает представление склада в виде адре-

сов или ячеек, которые физически могут быть чем угодно: от места на полу до подсекции стеллажа.

Для функционирования системы учета и распределения делового отхода необходимо оснастить корпусообрабатывающий цех необходимым оборудованием – термотрансферным принтером для печати штрих кодов, терминалом сбора данных, электромагнитным устройством для определения расположения делового отхода (в момент считывания штрих кода производится определение расположения считываемой этикетки, информация о котором передается на терминал сбора данных).

Перед каждым запуском производится распечатка наклеек с необходимым штрихом, которые приклеиваются к ярлыкам. Ярлыки, в свою очередь, приклеиваются к деловому отходу сразу же после его получения.

2 Разработка автоматизированной системы учета делового отхода

2.1 Ведомости карт раскроя

В базе данных предприятия фиксируются потоки металла, проходящие обработку в шестом цехе. При формировании ведомостей карт раскроя, задействуется информация о металле, используемом в запуске.

Важно отметить то, что в существующей базе данных предприятия уже существует условное обозначение деловых отходов.

Содержание ведомостей карт раскроя представлено на рис. 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Перечень деловых отходов Операция: КР(плазма)									
2	Проект 21300 Заказ 02450 Запуск: 0305									
3	тип	Габарит			Марка материала	грунт	Масса	От К/Р	Используется в К/Р	Примечание
4		толщина *	шир. *	длина						
5	ЛС	8.0*	640*	400	E32		16,08	702071		
6	ЛС	8.0*	1060*	970	E32		64,57	702071		
7	ЛС	9.0*	2000*	2860	E32		404,12	701700		
8	ЛС	10.0*	2000*	2870	E32		472,59	802063		
9	ЛС	12.0*	2400*	3400	E32		768,67	2088		
10	ЛС	14.0*	700*	1170	E40		90,01	001683		
11	ЛС	22.0*	2400*	1230	E40		509,81	901119		
12										
13	ИТОГО:	Кол-во отходов - 7 (шт)								
14		Масса отходов - 2325.85 (кг)								

Рис. 3. Перечень деловых отходов

Поскольку деловой отход листового металлопроката связан с картой раскроя, целесообразно сформировать код, исходя именно из этого. Так, деловой отход, полученный после резки листа из карты раскроя 1683 (для каждого заказа существует своя нумерация карт раскроя, используются четырехзначные числа), будет обозначен числом 001683. Деловой отход от этого отхода будет обозначен числом 901683, следующий отход – номером 801683. В ходе одного запуска происходит резка листов из разных карт раскроя.

В качестве основы взят штрих код EAN-13. Таким образом, необходимо заключить в 12 символах ту информацию, обращение к которой по-

зволит получить все остальные данные о конкретном деловом отходе. Уникальными значениями для делового отхода будут являться номер запуска, номер заказа и условное обозначение делового отхода.

Обладая данной информацией о деловом отходе, можно узнать обо всех остальных параметрах, таких, как габариты, марка стали и номер плавки - существующая база данных предприятия позволяет это.

Таким образом, разумно сформировать штрих код на основе номера заказа и номера делового отхода. Номер заказа состоит из 4 символов, номер делового отхода – из 5. Таким образом, задействуется 9 символов, еще 3 – остаются свободными.

Таким образом, в первоначальном варианте, штрих код представляет собой следующую комбинацию цифр:

10*номер заказа**номер делового отхода**контрольное число*

Выбор в качестве кода EAN13 позволяет формировать достаточно простой штрих код, при этом информация о всех характеристиках каждого конкретного делового отхода остается доступной.

Промаркировав имеющийся на складских площадях деловой отход таким образом, и осуществив определение его месторасположения, можно будет сократить поиск необходимого делового отхода до пары минут. Также введение автоматизированного учета делового отхода, имеющегося на складе, позволит использовать в запусках большее его количество, а значит, увеличит соотношение используемого и неиспользуемого делового отхода и сократит производственные площади, используемые для складирования делового отхода.

Для работы приложения используется Microsoft Visual Basic 6.0, ведомость карт раскроя формируется в MS Excel.

Информация, обеспечивающая работу приложения, хранится в таблицах MS Excel. Прикладные программы написаны с подключением компонентов ActiveX Data Object. ADO позволяет программе получить доступ к базе данных MS Excel с помощью провайдера OLE DB, который представляет собой интерфейс, обеспечивающий доступ к различным источникам данных. Чтобы использовать компоненты ADO необходимо подключить библиотеки, которые их содержат, а именно Microsoft ActiveX Data Objects 2.8, Library Microsoft ActiveX Data Objects Recordset 2.8 Library.

Приложение имеет базу данных, в которой хранится информация о получаемом деловом отходе в формате *.xls.

Работа с приложением осуществляется в форме, представленной на рис. 4.

3 Инструкция пользователя

3.1 Вход в приложение

Для запуска программы необходимо дважды щелкнуть левой клавишей мыши по ярлыку «Учет ДОЛМ», расположенному на рабочем столе компьютера. При этом открывается главная форма приложения.

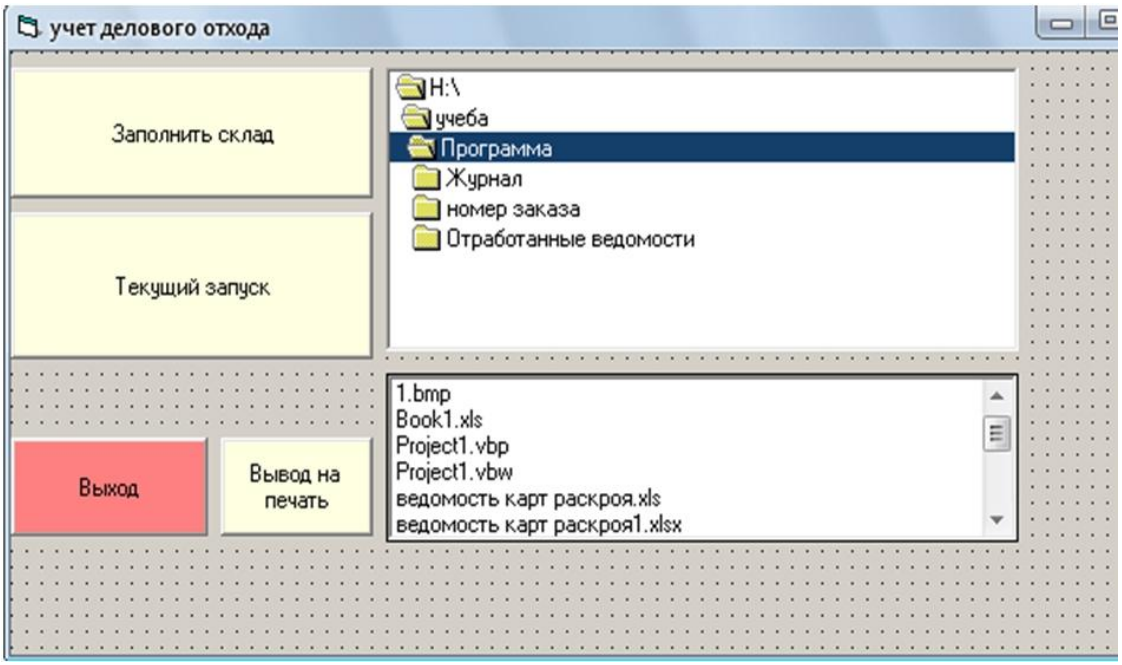


Рис. 4. Главная форма приложения

3.2 Заполнение базы данных делового отхода

Перед каждым очередным запуском на персональном компьютере пользователя появляется новый файл формата *.xls, содержащий, в том числе, и информацию о получаемом в ходе запуска деловом отходе. В первую очередь, необходимо дополнить базу данных делового отхода информацией об отходе, получаемом в ходе запуска. Для этого необходимо выбрать в окне программы файл с новой ведомостью карт раскроя и нажать на кнопку «Заполнить склад». Занесение информации о новом деловом отходе показано на рис. 5.

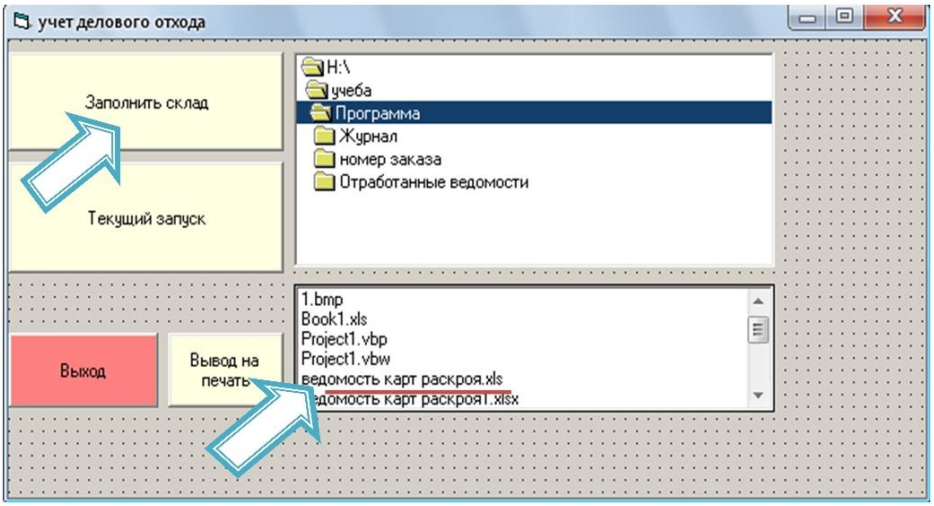


Рис. 5. Занесение информации о новом деловом отходе

После нажатия кнопки откроется таблица с дополненными данными о

деловом отходе, находящемся на складских площадях. Файл необходимо сохранить и закрыть.

3.3 Формирование таблицы с данными о деловом отходе текущего запуска

После занесения информации о поступающем на складские площади деловом отходе, требуется сформировать таблицу с данными об отходе, получаемом в текущем запуске (рис. 6). Для этого необходимо нажать на кнопку «Текущий запуск».

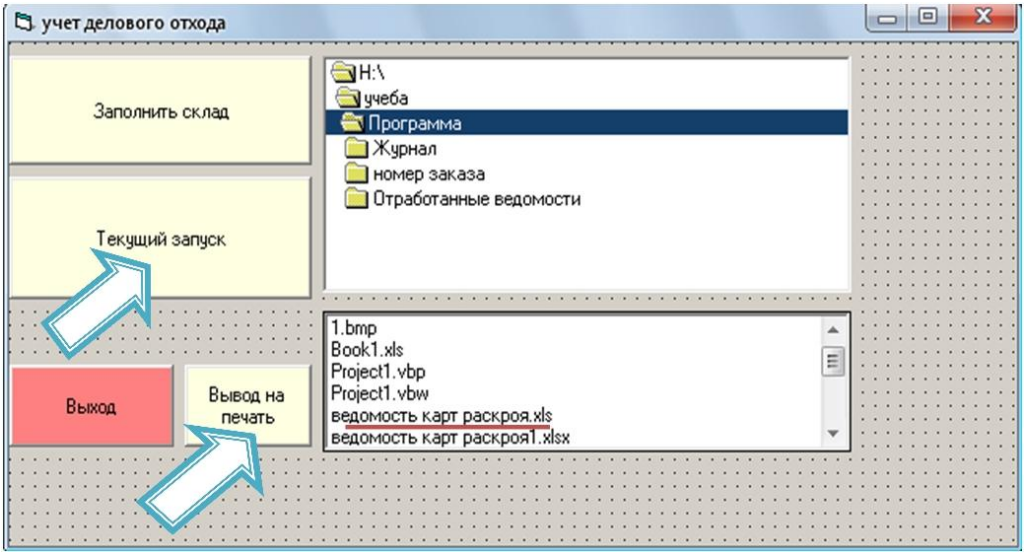


Рис. 6. Формирование таблицы с информацией о деловом отходе, получаемом в текущем запуске

3.4 Вывод на печать этикеток со штрих кодом

После образования делового отхода на участке термической резки, необходимо его промаркировать. Для этого на персональном компьютере, к которому подключен термотрансферный принтер, следует открыть приложение, выбрать файл, в названии которого содержится номер текущего запуска и нажать на кнопку «Вывод на печать».

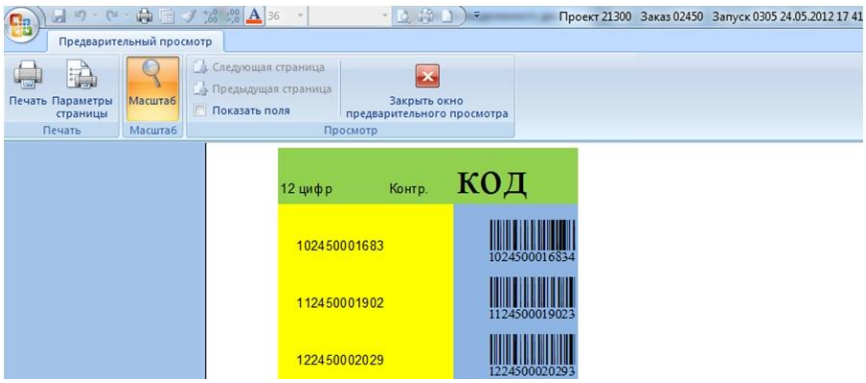


Рис. 7. Окно предварительного просмотра

После нажатия кнопки перед пользователем появится меню предварительного просмотра (рис. 7). Далее следует выбрать нужный принтер и распечатать этикетки.

3.5 Завершение работы с приложением

После выполнения всех необходимых действий, следует закрыть приложение путем нажатия кнопки «Выход» (рис. 8).

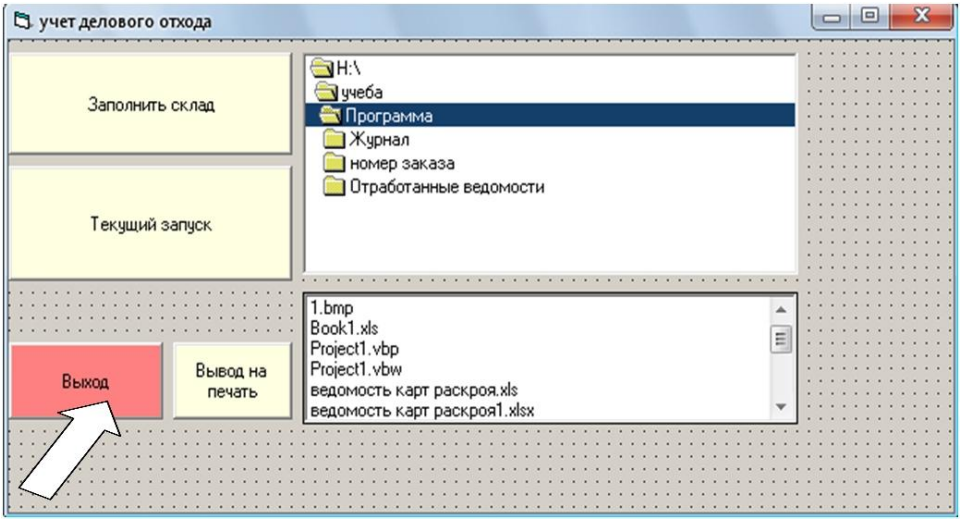


Рис. 8. Выход из программы

Заключение

В результате проделанной работы была разработана система учета и распределения делового отхода листового металла для повышения производительности корпусообрабатывающего цеха.

Для этого:

- изучена существующая технология обработки листового металла;
- разработан процесс учета и распределения делового отхода;
- создана этикетка для делового отхода
- выбрано необходимое оборудование;
- создано автоматизированное приложение, вносящее данные о находящемся на складских площадях деловом отходе, формирующее штрих код и выводящее на печать термотрансферные этикетки, создан удобный пользовательский интерфейс, разработана инструкция пользователя;

Внедрение системы учета и распределения делового отхода позволит значительно сократить время поиска делового отхода, исключит возможность ошибочного использования неподходящего материала, что в целом позитивно повлияет на качество изготавливаемых деталей корпуса судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.
2 ГОСТ РВ 15.002-2003 «Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Система менеджмента качества. Общие требования»
3 ГОСТ 19903-74 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент.
4 С. Д. Ильенкова, Н. Д. Ильенкова, А. В. Бандурин. Управление качеством. - Москва: ЮНИТИ, 2008. – 456 с.
5 М. Хальворсон. Microsoft Visual Basic 6.0 для профессионалов. Шаг за шагом: Самоучитель разработчика программного обеспечения.: Пер. с англ./М. Хальворсон. – Москва: ЭКОМ, 2007. – 716 с.
6 А.Н. Сергеев. Microsoft Office 2007: самоучитель. Диалектика Вильямс, 2009. – 432 с.
7 В.А. Арманд, В.В. Железнов. Штриховые коды в системах обработки информации. - М.: Радио и связь, 1989. - 92 с.
8 В.В. Семенихин, Ю.В. Емельянова, И.Н. Маканова. Организация складского учета. - Эксмо, 2006 – 86с.
9 Сайт ОАО «Адмиралтейские Верфи» - http:// www.admship.ru/
10 Сайт «IT Project» - http://www.itproject.ru/

УДК 657.3

Н. А. Николаев

КОРПОРАТИВНАЯ СОЦИАЛЬНАЯ ОТЧЕТНОСТЬ: ПРОБЛЕМЫ ПОВСЕМЕСТНОГО ВНЕДРЕНИЯ



Николай Александрович Николаев, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)535-8108, E-mail: nikolaev@kafedrapik.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены проблемы повсеместного внедрения корпоративной социальной отчетности в России и мире. По результатам исследования были выявлены три основных препятствия для распространения нефинансовой отчетности среди публичных компаний, поставлены основные вопросы, на которые необходимо найти ответы.

Ключевые слова: корпоративная социальная отчетность, интегрированная отчетность, нефинансовая отчетность, устойчивое развитие

N.A.Nikolaev

CORPORATE SOCIAL REPORTING: PROBLEMS OF UNIVERSAL ADAPTATION

Nikolai A. Nikolaev, St.Petersburg State Polytechnical University, Russia
e-mail: nikolaev@kafedrapik.ru

Abstract

The paper discusses the problem of universal adaptation of corporate social reporting in Russia and the world. The study identified three major obstacles for spreading of non-financial reporting of public companies, set the basic issues that need to be solved.

Key words: corporate social reporting, integrated reporting, non-financial reporting, sustainability

Последний мировой финансовый кризис – самый серьезный со времен 1930-х гг. – частично был вызван фокусированием инвесторов на краткосрочные финансовые результаты компаний в ущерб их долгосрочной деятельности. Стала очевидна необходимость учитывать

факторы долгосрочного развития компаний при принятии решений на финансовых рынках, и возникла дискуссия, в достаточной ли мере существующая система корпоративной отчетности способна раскрывать информацию о перспективах устойчивого развития компаний.

Угрозы долгосрочным интересам бизнеса, инвесторов и общества реально существуют и противодействие им должно базироваться на ясной и всеобъемлющей информации. Становится обычным делом, когда компания публикует отчетность о корпоративной социальной ответственности или о корпоративном управлении для того, чтобы проинформировать заинтересованных пользователей о воздействии бизнеса компании на окружающую среду и общество, об управлении рисками. В нынешних условиях, когда увеличивается роль социально ответственного инвестирования, это является необходимостью для привлечения средств в развитие бизнеса любой компании.

Корпоративная социальная отчетность – это термин, все чаще используемый для описания такого вида корпоративной отчетности, которая разъясняет, как достигается создание стоимости в краткосрочном, долгосрочном и среднесрочном периоде. Экологические, социальные и управленческие факторы (environmental, social and governance - ESG) оказывают сильное и постоянно увеличивающееся влияние на жизнестойкость компании и ее способность генерировать прибыль в долгосрочном плане. Конкретные факторы, способные оказать наибольшее влияние на стоимость компании, варьируются в зависимости от промышленного сектора, географического масштаба и природы конкретного бизнеса. Инвесторы, акционеры и другие заинтересованные пользователи отчетности в наибольшей степени заинтересованы в том, как эти факторы связаны со стратегией и будущей стоимостью компании.

На текущий момент представление корпоративных социальных отчетов в России и за рубежом осуществляется в различных форматах. Это отдельные социальные отчеты (широко различающиеся по содержанию у различных компаний), экологические отчеты (посвященные конкретно экологическим аспектам деятельности компании), отчеты в области устойчивого развития (раскрывающие одновременно экономические, экологические и социальные результаты деятельности компании), а также интегрированные отчеты (которые, в отличие от предыдущих, раскрывают нефинансовую информацию во взаимосвязи с финансовой). Наличие разных вариантов представления социальной отчетности лишь подтверждает существование повсеместной заинтересованности в ней.

Несмотря на вышеизложенное, повсеместному внедрению социальной корпоративной отчетности препятствуют следующие проблемы.

1. Регламентация подготовки корпоративной социальной отчетности

Проблема заключается в том, что в настоящее время не существует ни единого органа, ни единых стандартов подготовки корпоративной

социальной отчетности. В результате социальная отчетность компаний имеет различные содержание, формат и структуру представления, что осложняет процессы ее чтения и сопоставления.

Наиболее известные стандарты подготовки отчетности о факторах ESG – это руководства G3, созданные проектом GRI (Global Reporting Initiative – Инициатива по глобальной отчетности). Стандарты включают в себя 84 показателя эффективности, объединенные в шесть групп: в областях экономики (объем финансовой помощи, полученной от государственных органов, доля закупок у местных поставщиков и др.), экологии (доля сырья из переработанных отходов, масса выбросов парниковых газов и др.), организации труда (текучесть кадров, соотношение окладов по полу и др.), прав человека (количество жалоб, связанных с нарушением прав человека; доля поставщиков, прошедших проверку с точки зрения соблюдения прав человека и др.), взаимодействия с общественностью (меры, предпринятые в ответ на случаи коррупции; объем пожертвований политическим партиям, политикам и аффилированным с ними организациям и др.) ответственности за продукцию (например, общее число жалоб в отношении нарушения конфиденциальности данных о потребителях) и позволяющие определить степень устойчивости развития компании.

Существует также Международный комитет по интегрированной отчетности (International Integrated Reporting Committee – IIRC), но он в большей степени занят подготовкой концептуальных основ подготовки интегрированной отчетности, нежели конкретными правилами раскрытия информации о ESG факторах.

Кроме того есть также Совет по стандартам отчетности в области устойчивого развития (Sustainability Accounting Standards Board, SASB, США), деятельность которого сфокусирована, главным образом, на формировании специфичных для каждой отрасли ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators, KPI) по наиболее существенным (в плане финансовых результатов) ESG-факторам.

Есть также более мелкие группы (например, Climate Disclosure Standards Board - Совет по стандартам раскрытия информации о воздействии на климат, DVFA – Немецкое сообщество профессионалов в области инвестиций, а также ряд др.). Их деятельность перекликается, однако существуют некоторые политические конфликты.

Раскрытие нефинансовой информации не просто формальность, это заставляет отчитывающиеся компании действовать в более социально-ориентированной манере (в том числе и в плане экологии), что является значительным для всего мира. Если стандарты подготовки финансовой отчетности разрабатывались постепенно в течение десятков лет, в случае с нефинансовой отчетностью такие сроки могут быть критичными. Основной стратегический вопрос здесь: будут ли стандарты

универсальными или специфичными для отдельных отраслей? С одной стороны для целей сравнимости отчетности хорошо иметь общие стандарты для всех (как в случае с финансовой отчетностью). С другой стороны, конкретные ESG-факторы разнятся в зависимости от отрасли. Например, у консалтинговой компании, в отличие от энергетического холдинга вряд ли будет существенным фактор загрязнения окружающей среды.

2. Обязательность корпоративной социальной отчетности

Улучшение качества корпоративной отчетности в настоящее время стимулируется, главным образом, некоммерческими организациями и стейкхолдерами (stakeholders, заинтересованные в деятельности компании лица) компаний. Тем не менее, наблюдается тенденция проявления интереса к данному вопросу у властных структур различных стран. Например, в ЮАР уже существует законодательное требование к публикации интегрированной отчетности компаний, акции которых торгуются Йоханнесбургской фондовой бирже (на базе правила «раскрывай или объясни, почему не раскрыл»). Власти Дании и Франции приняли законы, требующие включать в годовой отчет компаний информацию о корпоративной ответственности, подобное планируется во всем Европейском союзе. В Великобритании управляющие пенсионными фондами должны раскрывать информацию о социально ответственном подходе к инвестированию средств своих клиентов. В Малайзии главная фондовая биржа потребовала у всех листинговых компаний отчитываться по программам корпоративной социальной ответственности.

Существуют разные мнения, устанавливать ли обязательность нефинансовой отчетности или нет. Одни специалисты указывают на то, что если компания считает хорошим делом раскрытие информации о ESG-факторах, то она будет делать это добровольно. Сторонники обязательности такой отчетности ставят под сомнение это заявление, утверждая, что хотя одни компании так и будут делать, то другие – нет, что означает наличие неполной информации на финансовых рынках. Последнее не лишено смысла. Кроме того, следует принять во внимание, что нынешние финансовые рынки не смогли бы быть настолько развитыми, если бы финансовая отчетность не была обязательной. При этом стоит также учесть конкурентный фактор. Если бы одна из лидирующих компаний какой-либо отрасли решила бы публиковать корпоративную социальную отчетность, ее конкуренты, скорей всего, переняли бы это, а возможно и сделали бы в гораздо лучшем виде.

В любом случае, как и с МСФО, вопрос обязательности нефинансовой отчетности находится в компетенции национальных правительств соответствующих стран. При этом властям стоит учитывать, что, исходя из возрастающего интереса инвесторов к нефинансовой информации, введение каких-либо законодательных требований к публикации сведений

и нефинансовых факторах и показателях (например, в формате интегрированного отчета) будет стимулировать приток инвестиций в страну, что особенно важно для развития инфраструктуры и отечественной промышленности.

3. Аудит корпоративной социальной отчетности

В настоящее время заверение внешним аудитором корпоративной социальной отчетности не получило достаточного распространения, возможно из-за того, что руководители отчитывающихся компаний не считают это важным. С этим сложно согласиться, поскольку внешние пользователи такой отчетности желают иметь достаточную уверенность в том, что организация представила достоверную и объективную информацию о корпоративном управлении, факторах социальной среды и бизнес-рисках. Наличие внешнего аудита такой информации позволит, в частности, инвесторам более точно оценить стоимость компании и принимать решение о возможности и сумме инвестиций в ее деятельность.

Некоторые компании уже позаботились об аудите своей нефинансовой отчетности. Так ОАО «ТНК-ВР» привлекло PricewaterhouseCoopers для проведения аудита своей отчетности в области устойчивого развития, подготовленной за 2011 г. по стандартам GRI. Государственная корпорация «Росатом», участник пилотной программы Комитета по интегрированной отчетности (IIRC), получила аудиторское заключение компании KPMG по своей интегрированной отчетности за 2011 г. В этом документе аудиторская компания констатирует наблюдаемую активность госкорпорации в сфере устойчивого развития и тестирует его учетную систему на соответствие требованиям стандартов AA1000SES (Стандарт взаимодействия с заинтересованными сторонами) и ISAE 3000 (Международный стандарт по осуществлению проверок отчетности, кроме аудита), а также заверяет соответствие годового публичного отчета уровню применения "B+" Руководства GRI G3.

Преодоление этих трех препятствий будет значительно способствовать повсеместному внедрению корпоративной социальной отчетности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.Л. Вещунова, Ю.Ю. Кочинев. Формирование финансового результата от деятельности в бухгалтерской отчетности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – Т.2. – № 2. – С. 203-210.
2. Отчет об устойчивом развитии 2011 ОАО «ТНК-ВР» [Электронный ресурс] // ОАО «ТНК-ВР». URL: http://www.tnk-bp.ru/upload/iblock/d96/sr_2011_rus.pdf (дата обращения 05.03.2013).
3. Публичный годовой отчет Госкорпорации «Росатом» за 2011 год [Электронный ресурс] // Госкорпорация «Росатом». URL:

http://www.rosatom.ru/resources/22d0a2804e9bed2a9666bf91bc00a112/Rosatom_annual_report_2011_rus_web.pdf (дата обращения 05.03.2013).
4. AA1000 Stakeholder Engagement Standard (AA1000SES) [Электронный ресурс] // AccountAbility. URL: http://www.accountability.org/images/content/5/4/542/AA1000SES%202010%20PRINT.pdf (дата обращения 05.03.2013).
5. Climate Disclosure Standards Board [Электронный ресурс] // Integrating climate change into mainstream financial reports. URL: http://www.cdsb.net/ (дата обращения 05.03.2013).
6. Danish Financial Statements Act [Электронный ресурс] // Accounts – Denmark. URL: http://europa.eu/youreurope/business/managing-business/keeping-accounts/denmark/index_en.htm (дата обращения 05.03.2013).
7. Global Reporting Initiative [Электронный ресурс] // GRI Project. URL: https://www.globalreporting.org/Pages/default.aspx (дата обращения 05.03.2013).
8. JSE – Listings Requirements [Электронный ресурс] // Johannesburg Stock Exchange. URL: http://www.jse.co.za/How-To-List/Listing-requirements.aspx (дата обращения 05.03.2013).
9. Sustainability Accounting Standards Board [Электронный ресурс] // SASB. URL: http://www.sasb.org/ (дата обращения 05.03.2013).
10. The IIRC | INTEGRATED REPORTING [Электронный ресурс] // International Integrated Reporting Council. URL: http://www.theiirc.org/ (дата обращения: 05.03.2013).

УДК 004.4'23

И.П. Петров

РАЗРАБОТКА ПРИКЛАДНЫХ ВИЗУАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ В СРЕДЕ Delphi



Игорь Пантелеевич Петров к.т.н., доцент кафедры «Конструкторско-технологических инноваций», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия, Тел.: (812)-534-0764

Аннотация

В настоящее время сохраняется тенденция к увеличению объема, производимого в мире программного обеспечения. В области машиностроения такая тенденция обусловлена широким использованием CALS-технологий. Каждый этап жизненного цикла изделия требует соответствующего программного обеспечения, формирующего интегрированное информационное пространство предприятия.

В качестве программного обеспечения используют универсальные CAD/CAM/CAM/PDM автоматизированные системы или разрабатывают новые программы в системах программирования.

Одним из основных требований к системам программирования является сокращение сроков разработки программ. Этому требованию удовлетворяют, прежде всего, так называемые RAD (Rapid Application Development) – системы. Примерами таких систем являются: Visual Basic, C++, C++Builder, Delphi, Lazarus и др.. Прежде всего, высокая скорость разработки программ связана с наличием готовых элементов интерфейса Windows в виде визуальных компонент или элементов ActiveX. Эти системы включают в себя также ряд технологий например: сетевые и интернет технологии, работу с базами данных, COM – технологии, создание интерфейсов и др. Особо следует отметить возможность C++ и Delphi создавать новые элементы ActiveX и визуальные компоненты.

В работе рассмотрены методы разработки визуальных компонент общего и специального назначения в среде Delphi и их использования в машиностроительных расчетах.

Ключевые слова: программы, визуальные компоненты, наследование, свойства, события, агрегация, база данных, машиностроительные расчеты.

DEVELOPMENT OF APPLIED VISUAL COMPONENT FOR THE MACHINE-BUILDING SETTLEMENTS IN THE ENVIRONMENT OF Delphi

Igor P. Petrov PhD, St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

At present, the trend towards an increase in production in the world of software. In engineering, this trend is due to the extensive use of CALS-technologies. Each phase of the life cycle of the product requires proper software that produces integrated information about ¬ space enterprise.
As software use generic CAD/CAM/CAM/PDM systems or developing new programs in systems programming.

One of the major requirements of programming is shortening programming. This requirement met, above all, the so called RAD (Rapid Application Development) – system. Examples of such systems are: Visual Basic, C++, C ++ Builder, Delphi, Lazarus, etc.. First of all, the high speed development of programs related to the availability of ready-to-use Windows interface elements in the form of a visual component or ActiveX controls. These systems also include a number of technologies such as networking and Internet technologies, working with databases, COM technologies, creating interfaces, etc. Special mention should be made of the possibility of c ++ and Delphi to create new ActiveX controls and visual components.
The article considers how to develop visual component of General and special purpose Delphi and their use in engineering calculation.

Key words: programs, Visual components, derivation, properties, events, aggregation, database, engineering calculations.

Визуальные и не визуальные компоненты являются развитием объектных типов данных, являющихся основой объектно-ориентированного программирования. Преимущества этого стиля подробно рассмотрены Г. Буч [2], Р. Лафоре [6], Эллис М. и Строуструп В. [9]. В C++, C++ Builder, Delphi, Lazarus и некоторых других языках программирования объектные типы называют *class*. Визуальные компоненты являются основой визуального стиля программирования, используемого в RAD системах. Delphi содержит сотни готовых классов, образующих классовую иерархию. Особое место в этой иерархии занимают компонентные классы, являющиеся наследниками класса TComponent. Именно этот компонент обеспечивает всех своих потомков интерфейсом времени проектирования (design-time interface). Все потомки TComponent могут быть включены в палитру визуальных компонент, взаимодействовать: с формой, инспектором и дере-

вом объектов, с редактором кода. Компонентные классы являются предками новых визуальных компонент, разрабатываемых программистом.

Далее рассмотрены методы разработки новых визуальных компонент общего назначения, предназначенных для ввода числовых значений, и специальных компонент, использующих базы данных машиностроительных изделий.

Компоненты ввода единичных числовых значений

Числовые значения могут быть одиночными, объединены в массивы, быть целыми или вещественными. Далее отдельно рассмотрены метод разработки компонент ввода единственных числовых значение, и метод разработки компонент ввода массивов числовых значений.

В настоящее время сложились определенные методы и этапы разработки новых визуальных компонент. Конопка Рэй [3] указал следующие этапы:

1. Создание модуля, в котором приводится описание класса компонента с указанием предка.
2. Создание полей, свойств, методов, событий компонента.
3. Разработка проекта, тестирующего новый компонент.
4. Регистрация и установка в палитре компонент.

Первые два этапа связаны с проектированием класса нового компонента. Как правило, все новые компоненты являются потомками некоторого класса предка и наследуют его методы, поля, события и свойства. В новом классе могут быть добавлены новые члены класса. Такой подход для разработки нового класса был рассмотрен в работах [1], [3], [4], [5], [8]. Далее рассмотрены два новых компонентных класса, TNumEdit и TNumLabEdit, являющихся наследниками классов TEdit и TLabeledEdit соответственно.

Иерархия классов новых визуальных компонент для ввода числовых значений показана на рис. 1.

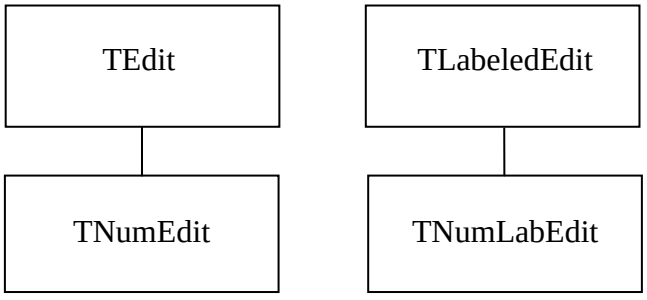


Рис. 1. Иерархия классов визуальных компонент ввода числовых значений

Прежде всего они наследуют от предков поле редактирования символов. В указанных компонентах перекрывается метод KeyPress, возвращающий значения символа нажатой клавиши. В поле ввода будет сформи-

рована строка символов, допустимых для преобразования в числовые значения.

В компонентах TNumEdit и TNumLabEdit предусмотрена возможность формировать разные наборы символов для вещественных и целых чисел. Набор этих символов зависит от значения нового свойства NumType типа TFloatIntType. При вводе целых чисел (NumType=TInt) метод KeyPress использует символы: ’–’ – минус, ’0’.. ’9’ – числовые, ’#13’ – Enter, ’#8’ – Backspase.

Тип TFloatIntType определён в разделе Type модуля NumEdit как перечислимый

```
Type
    TFloatIntType = (TFloat,TInt);
```

Значения свойства NumType устанавливают на этапе проектирования программы, выбирая из списка значение TFloat или TInt (рис. 2).

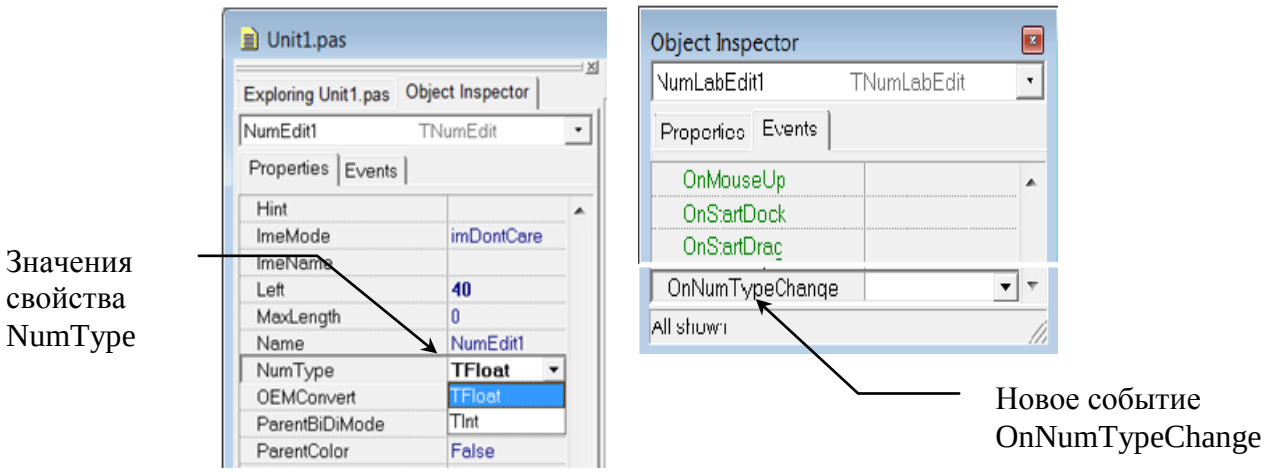


Рис. 2. Окно Object Inspector с новым свойством `NumType` и новым событием OnNumTypeChange компонента TNumEdit

Свойство NumType отображается на вкладке Propertits в окне Object Inspector и определяет тип вводимых числовых значений:

TInt – целые числа;

TFloat – вещественные числа.

При вводе вещественных чисел, дополнительно к указанным выше символам, используется символ, разделяющий целую и дробную части числа. В методе KeyPress для ввода символа разделителя используется системная переменная Delphi DecimalSeparator. В зависимости от настройки Windows переменная DecimalSeparator может принимать одно из двух значений – ’.’ или ’,’.

На рис. 3 показаны компоненты TNumEdit и TNumLabEdit на форме в момент проектирования.

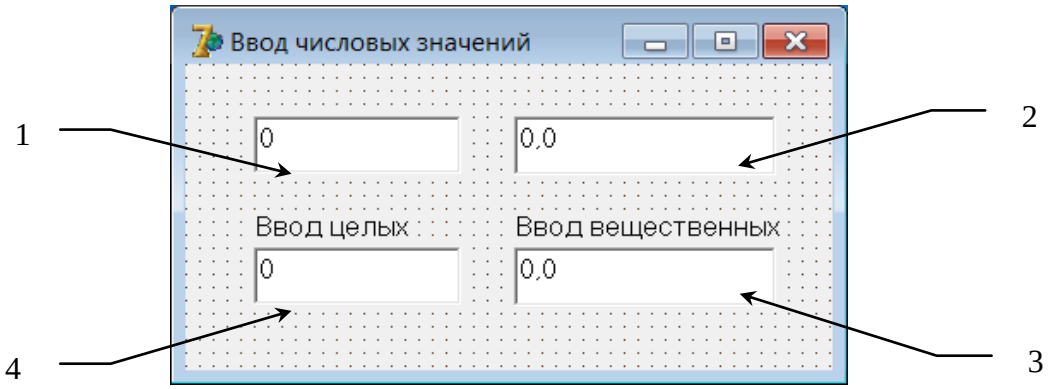


Рис. 3. Вид компонента TNumEdit и TNumLabEdit
на форме на этапе проектирования
1,2 – компонент TNumEdit; 3,4 – компонент TNumLabEdit;
1,4 – ввод целых чисел; 2,3 – ввод вещественных чисел.

Новое событием OnNumTypeChange связано с изменением свойства NumType. Каждое изменение NumType одновременно меняет значение поля ввода.

Компоненты ввода массивов числовых значений

Компоненты ввода массива символов строятся методом агрегации нескольких компонент в друго компоненте.

Компонент TNumMas является наследником стандартного компонента TPanel (рис. 4), а также инкапсулирует еще три компонента – TLabel, TSpinEdit и TStringGrid. На рис. 4 показан компонент TNumMas на форме.

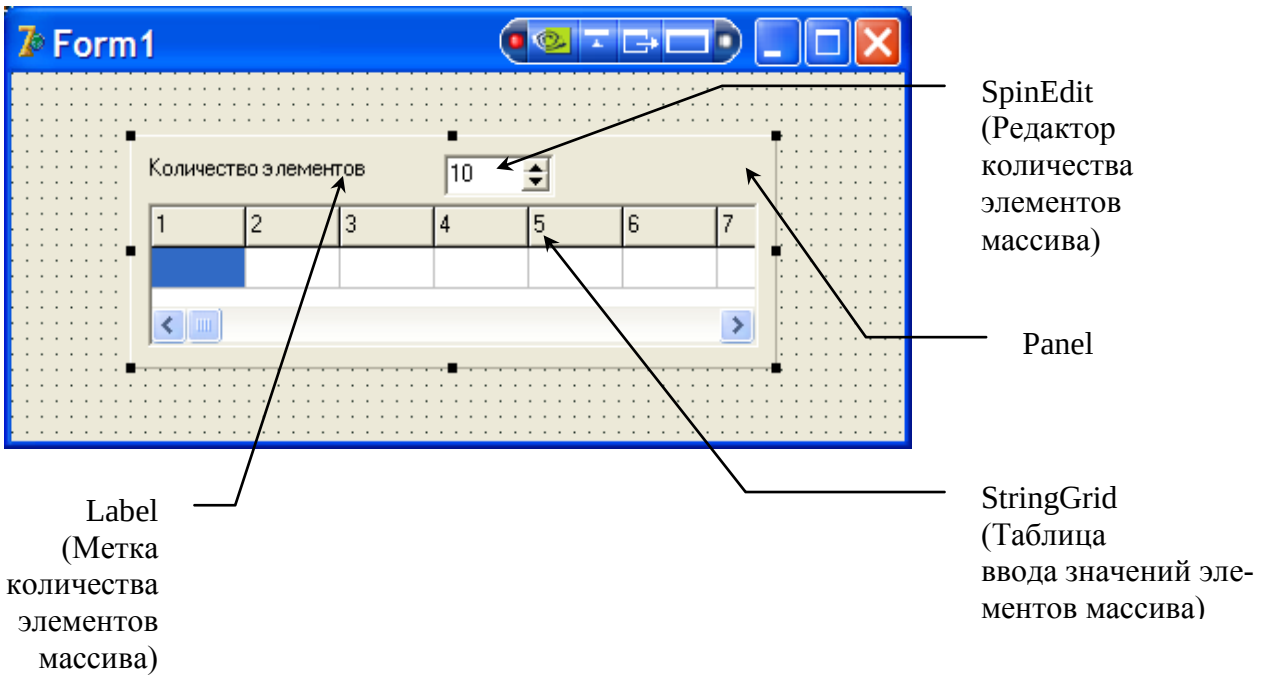


Рис. 4. Вид компонента TNumMas на форме

Компонент TLabel используется как строка сообщение. TSpinEdit устанавливает количество вводимых значений элементов массива, которое можно задать в строке редактора или кнопками: ▲ – увеличить, ▼ – уменьшить. Компонент TStringGrid представляет собой двумерную таблицу строк. В ячейках первой строки указаны номера вводимых значений массива, а во второй – сами значения. Количество вводимых значений можно изменить компонентой TSpinEdit как на этапе проектирования программы, так и на этапе выполнения.

Свойства компонента TNumMas, отображаемые в окне инспектора объектов (Object Inspector), показаны в таблице 1.

Таблица 1. Свойства компонента TNumMas

Имя свойства	Назначение
QuantCol	Количество элементов массива
NumType	Тип чисел. (TFloat – вещественные числа, TInt – целые числа)
Свойства TLabel	
ColCapL	Расстояние метки до левой границе компонента TNumMas
ColCapT	Расстояние метки до верхней границе компонента TNumMas
ColCapW	Ширина метки
ColCapVis	Видимость метки (True – видна, False – невидна)
ColText	Текст метки
Свойства TSpinEdit	
ColSpinL	Расстояние редактора до левой границе компонента TNumMas
ColSpinT	Расстояние редактора до верхней границе компонента TNumMas
KEditVis	Видимость редактора (True – видна, False – невидна)
Свойства TStrigGrid	
GrLeft	Расстояние сетки до левой границе компонента TNumMas
GrTop	Расстояние сетки до верхней границе компонента TNumMas
GrHeight	Высота сетки ввода
GrWidth	Ширина сетки ввода
GrVisible	Видимость сетки (True – видна, False – невидна)

Компонент TNumMatrN

Компонент TNumMatrN является наследником компонента TNumMas (рис. 1) и предназначен для ввода значений элементов квадратной матрицы. Он не имеет новых свойств и компонент. На рис. 5 показан компонент TNumMatrN на форме.

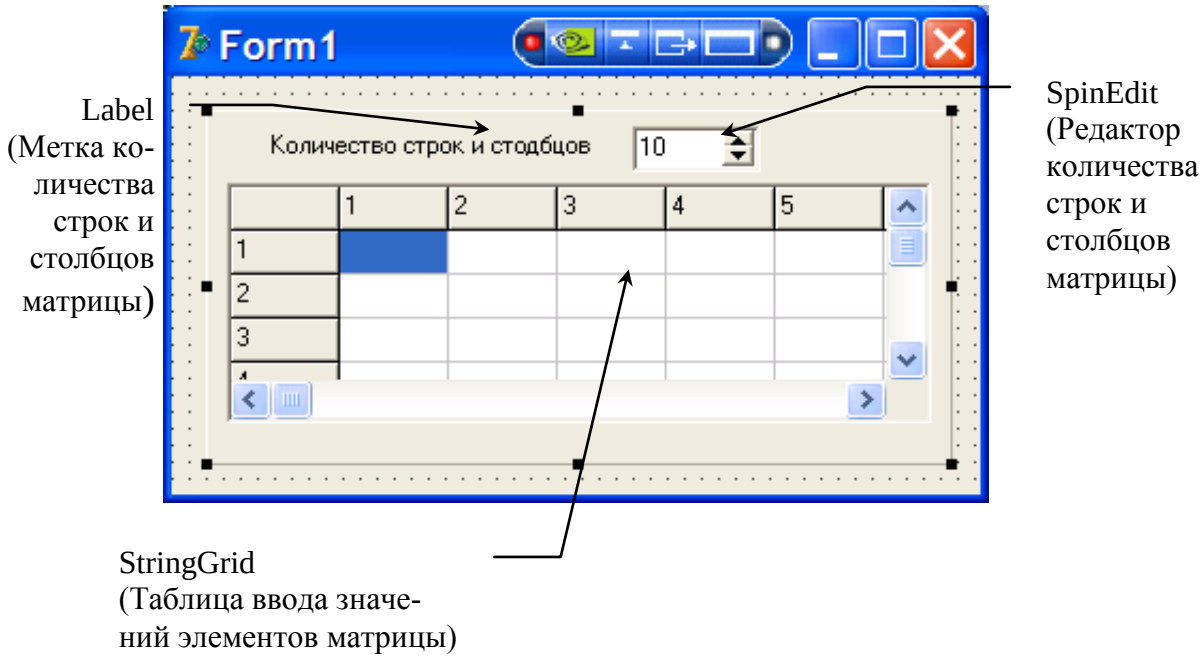


Рис. 5. Вид компонента TNumMatrN на форме

В компоненте TNumMatrN редактор SpinEdit изменяет одновременно количество строк и столбцов квадратной матрицы. Свойства, унаследованные от TNumMas (Табл.1), будут отображаться в окне инспектора объектов (Object Inspector)

Компонент TNumMatrMN

Компонент TNumMatrMN является наследником компонента TNumMatrN (рис.1) и предназначен для ввода значений элементов прямоугольной матрицы. На рис. 6 показан компонент TNumMatrMN на форме.

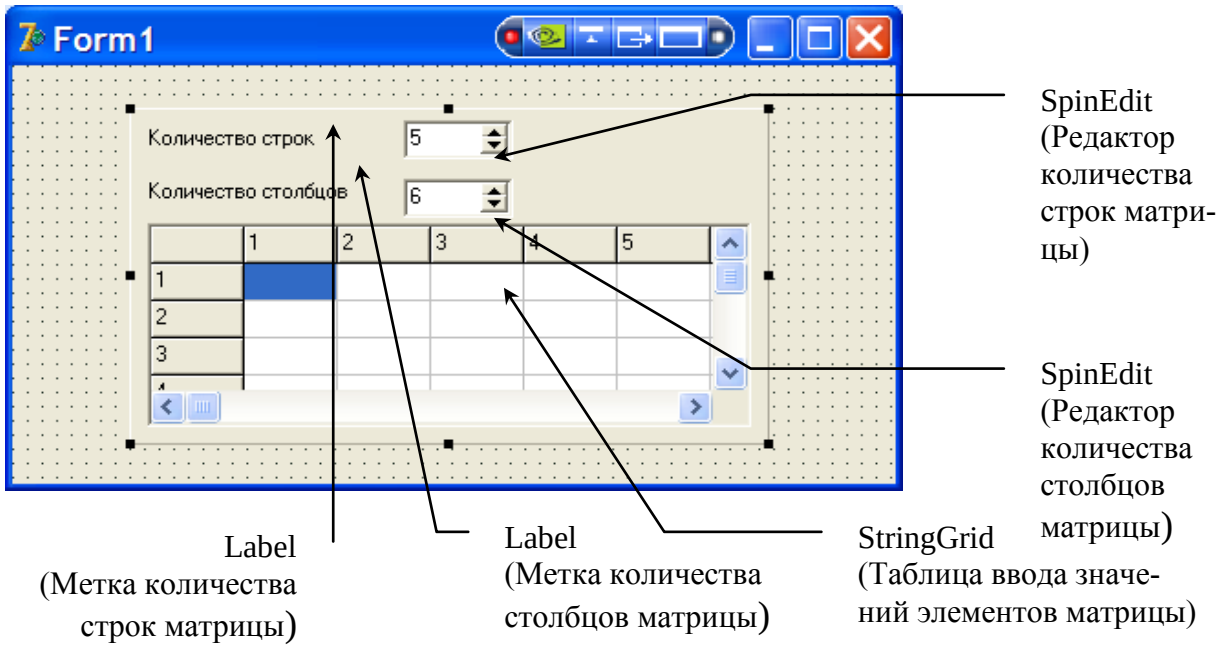


Рис. 6. Вид компонента TNumMatrMN на форме

Компонент TNumMatrMN наследует компоненты и свойства родительского компонента TNumMatrN, и дополнительно инкапсулирует еще два компонента (рис. 6) – TLabel и TSpinEdit. Новые свойства компонента TNumMatrMN, отображаемые в окне инспектора объектов (Object Inspector) на этапе проектирования, показаны в таблице 2.

Таблица 2. Новые свойства компонента TNumMatrMN

Имя свойства	Назначение
QuantRow	Количество строк матрицы
Свойства TLabel	
RowCapL	Расстояние метки до левой границе компонента TNumMatrMN
RowCapT	Расстояние метки до верхней границе компонента TNumMatrMN
RowCapW	Ширина метки
RowText	Текст метки
RowCapVis	Видимость метки (True – видна, False – невидна)
Свойства TSpinEdit	
RowSpinL	Расстояние редактора до левой границе компонента TNumMatrMN
RowSpinT	Расстояние редактора до верхней границе компонента TNumMatrMN
REditVis	Видимость редактора (True – видна, False – невидна)

Все рассмотренные компоненты были установлены на новой странице FlIntEdit палитры компонент, показанной на рис. 7.

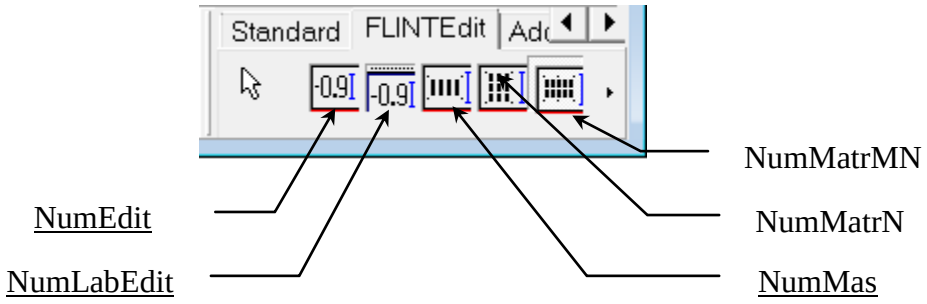


Рис. 7. Вид страницы компонент FlIntEdit

Специальные компоненты

Рассмотрим этап расчета барабана и двигателя механизма подъема крана. Необходимые расчетные формулы будем использовать из справочника по кранам [7]. Расчет организуем на форме, показанной на Рис. 8. Ввод необходимых данных может быть выполнен в строке ввода или выбран из соответствующей базы данных после нажатия кнопки «Из базы» рис. 9.

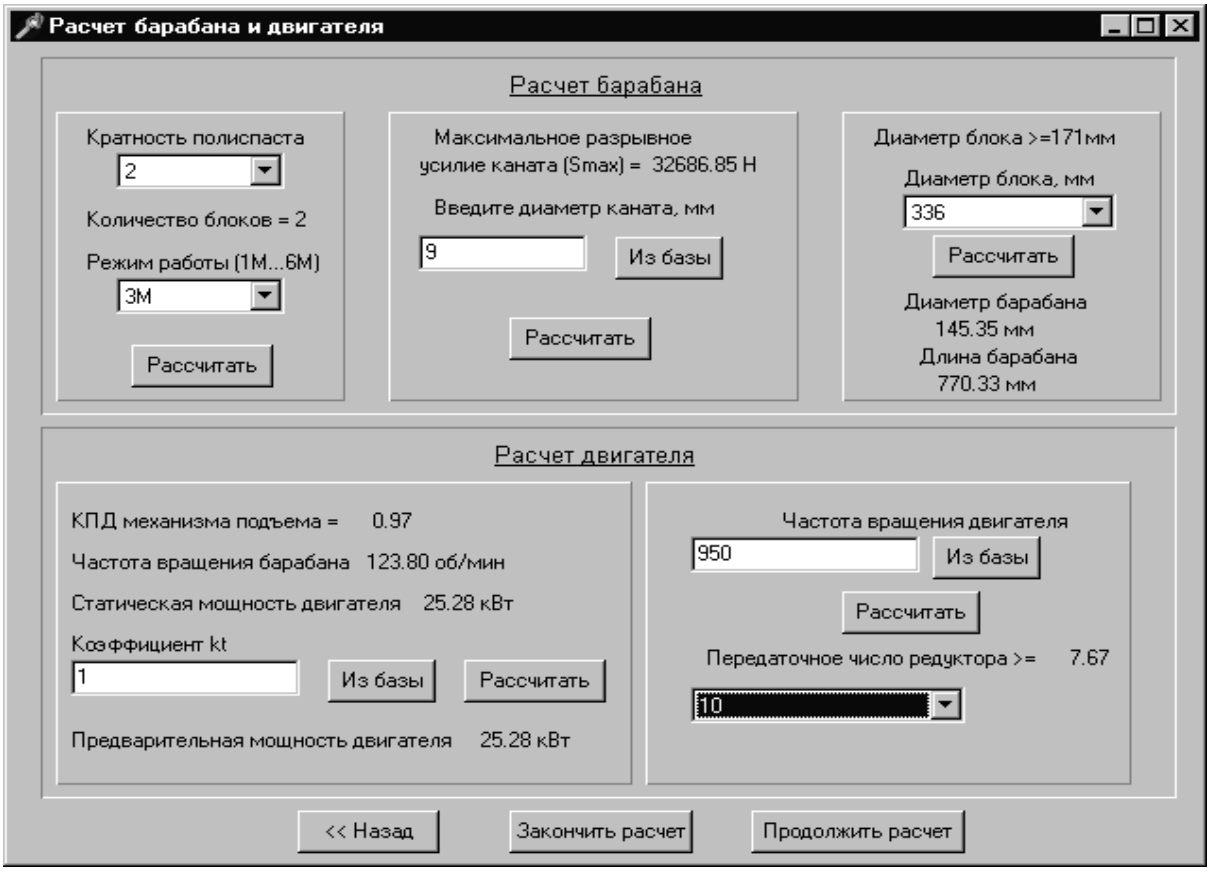


Рис. 8. Окно расчета барабана и двигателя

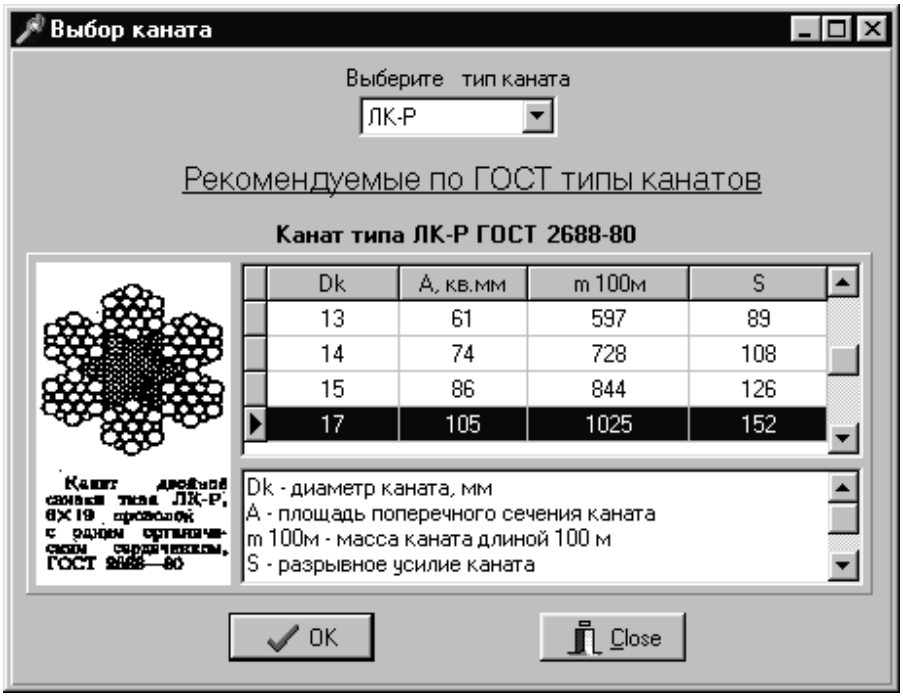


Рис. 9. Окно выбора параметров каната из базы данных

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобровский С. Delphi 5: учебный курс – СПб,: Издательство «Питер» , 2000. – 640 с.: ил. ISBN 5-272-00026-9
2. Г.Буч Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++, 2-е изд./Пер. с англ. – М.: «Издательство Бином», СПб.: «Невский диалект», 1999 г. – 560 с., ил.
3. Конопка Рэй. Создание оригинальных компонент в среде Delphi: Пер. с англ. /Рей Конопка. – К.: НИПФ – «ДиаСофт Лтд.», 1996. – 512 с.
4. Культин Н. Delphi 3. Программирование на Object Pascal – Спб.: BHV – Санкт-Петербург, 1998. – 304с., ил.
5. Культин Н.Б. Основы программирования в Turbo C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 464 с.: ил. + CD-ROM ISBN 978-5-9775-0062-3
6. Р. Лафоре Объектно- ориентированное программирование в C++: 4-е издание. – СПб,: Издательство «Питер» , 2004. СПб,: Издательство «Питер» , 2004. – 923 с.
7. Справочник по кранам: В 2 т. Т.2. Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов/ М.П. Александров, М.М. Гохберг, А.А. Ковин и др.; Под общ. ред. М.М. Гохберга, – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1988. – 559 с.: ил. ISBN 5-217-00289-1.
8. Фаронов В.В. Delphi. Программирование на языке высокого уровня: Учебник для вузов – Спб.: Питер, 2008. – 640 с.: ил.
9. Эллис М., Строуструп В. Справочное руководство по языку программирования C++ с комментариями: Пер. с англ. – М.: Мир, 1992 – 445 с., ил.

УДК 338.2

О.В. Попова, О.А. Пономарева

РОЛЬ АНАЛИЗА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ФОРМИРОВАНИИ СТРАТЕГИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ



Ольга Васильевна Попова, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 534-74-82, E-mail: ov.popova@mail.ru



Ольга Алексеевна Пономарева, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 534-74-82, E-mail: olga_pn@list.ru

Аннотация

В работе обоснована необходимость оценки ресурсов как источника конкурентных преимуществ предприятия и базиса для формулирования стратегии промышленного предприятия. Рассмотрены возможные аналитические методы, используемые для этой цели, такие как факторный анализ выпуска продукции, декомпозиция показателей прибыльности, построение матричной модели.

Ключевые слова: стратегия, ресурсный потенциал, факторный анализ, экстенсивность и интенсивность использования ресурсов, декомпозиция показателей прибыльности

O.V. Popova, O.A. Ponomareva

THE ROLE OF RESOURCE POTENTIAL IN STRATEGY DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISE

Olga V. Popova[1], e-mail: ov.popova@mail.ru;
Olga A. Ponomareva[1], e-mail: olga_pn@list.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The necessity of resource assessment as the source of competitive advantages and basis of strategy formulation of industrial enterprise is proved.

Analytic methods for this purpose are considered, for example, production output factor analysis, profitability indexes decomposition, matrix model construction.

Key words: strategy, resource potential, factor analysis, extensiveness and intensiveness of use of resources, profitability indexes decomposition

В условиях растущей международной конкуренции основной акцент в анализе стратегий сместился с поиска источников прибыли предприятия во внешней среде на резервы прибыли внутри самой фирмы, от планирования диверсификации и роста фирм к достижению конкурентоспособности.

Катькало В.С. выделяет три этапа в развитии теории стратегического управления [3]. Если для первого этапа теории стратегического управления был характерен приоритет внутренних аспектов деятельности фирмы, для второго этапа – акцент на внешнее окружение, то особенностью третьего этапа стал возврат к внутриорганизационным способностям. Третий этап, начавшийся в конце 1980-х гг., был ознаменован переходом теории стратегического управления к развитию на собственной основе. Ресурсы и способности фирмы рассматриваются как основной источник конкурентного преимущества и фундамент для формулирования стратегии.

Как отмечает Катькало В. С. «два важнейших отличия стратегического образа мышления на основе ресурсного подхода на этом этапе: приоритет создания ценности, а не минимизация издержек, а также акцент усилий не на подавление любой ценой соперника в рыночной конкуренции, а на создание собственных, трудно копируемых другими фирмами компетенций как залога лидерства в бизнесе» [3].

Грант Р. считает, что «усиление акцента на роли ресурсов и способностей как базисе стратегии проистекает из двух факторов. Во-первых, по мере того как ситуация в отрасли становится все более нестабильной, именно внутренние ресурсы фирмы, а не внешние ресурсы и возможности рынка, следует рассматривать как надежную основу формирования стратегии. Во-вторых, становится все более очевидно, что именно конкурентное преимущество, а не привлекательность отрасли, являются главным источником высокой прибыльности» [2].

Высокая доходность может проистекать из двух источников: нахождения в привлекательной отрасли и получения конкурентного преимущества по сравнению с соперниками. Из этих двух факторов более важным является конкурентное преимущество. Интернационализация и дерегулирование привели к усилению конкурентного давления в большинстве рыночных секторов. Главной целью стратегии становится усиление конкурентного преимущества посредством развития и использования ресурсов и способностей, а не поиски спасения от натисков конкурентов.

В таких условиях необходимо оценить, насколько ресурсы и способности фирмы могут обеспечить устойчивое конкурентное преимущество, и использовать результаты анализа ресурсов для создания стратегий, опирающихся на внутренние сильные стороны фирмы и защищающие от внутренних слабостей, идентифицировать средства, которые позволят фирме раскрыть свои ресурсы и способности.

Ресурсный подход при формировании стратегии подчеркивает уникальность каждой организации и утверждает, что секрет прибыльности заключается не в том, чтобы делать то же самое, что все остальные предприятия, а в том, чтобы использовать собственные отличия. Создание конкурентного преимущества означает формулирование и реализацию стратегии, которая опиралась бы на уникальность портфеля ресурсов и способностей каждой фирмы. Формированию стратегии предприятия с акцентом на ресурсный потенциал уделено внимание и в работе Квинта В. [11].

Рассматривая ресурсный потенциал как источник генерирования доходов, прибыли и стоимости предприятия, при проведении стратегического анализа необходимо отталкиваться от анализа показателей доходности организации. Оценкой эффективности использования совокупных ресурсов организации является показатель рентабельности активов (экономическая рентабельность, ROA), который условно называют коэффициентом генерирования доходов. Данный показатель характеризует возможности получения доходов комбинацией активов и показывает, сколько рублей операционной прибыли приходится на один рубль, вложенный в активы предприятия. Дальнейшая декомпозиция показателя рентабельности активов дает возможность также определить вклад отдельных видов ресурсов в формирование прибыли, оценить, какие возможности существуют для более прибыльного использования уже имеющихся активов.

Варианты декомпозиции показателя экономической рентабельности представлены в работах Ковалева В.В. [4], Шеремета А.Д. [10] и других авторов [1,7].

Основные факторные модели рентабельности активов (R):

- двухфакторная мультипликативная

$$R = A \times B,$$

где A – уровень чистой рентабельности продаж; B - коэффициент оборачиваемости активов;

- трёхфакторная смешанная

$$R = \frac{A}{(E + F)},$$

где E – фондоемкость по основному капиталу; F - коэффициент закрепления оборотных активов в выручке;

- четырёхфакторная мультипликативная

$$R = (G - 1) \times H \times I \times J,$$

где G – коэффициент соотношения выручки и себестоимости; H – доля оборотных активов в имуществе; I – доля запасов в оборотных активах; J – коэффициент соотношения себестоимости и запасов;

- пятифакторная смешанная

$$R = \frac{1 - (MC + WC + AC)}{(E + F)},$$

где MC – материалоемкость; WC – зарплатоемкость; AC – амортизациеемкость;

- восьмифакторная мультипликативная

$$R = A \times N \times O \times P \times Q \times S \times T \times D,$$

где N – коэффициент оборачиваемости текущих активов; O – коэффициент текущей ликвидности; P – коэффициент соотношения краткосрочных обязательств и дебиторской задолженности; Q - коэффициент соотношения дебиторской и кредиторской задолженности; S – доля кредиторской задолженности в заемных средствах; T – коэффициент финансового левериджа.

Такой анализ позволяет идентифицировать источники неудовлетворительной эффективности использования ресурсов на уровне определенных видов деятельности, быстро оценивать и проводить анализ слабых и сильных сторон по сравнению с конкурентами.

У каждого хозяйствующего субъекта имеется возможность выбора между экстенсивным и интенсивным путем развития, что безусловно имеет смысл рассматривать при оценке ресурсного потенциала. Экономическое развитие подразумевает вовлечение в оборот дополнительных средств, достижение увеличения выпуска продукции за счет привлечения новых работников, приобретения материалов, ввода в действие нового оборудования и осуществления капитальных затрат в здания и сооружения при значительном расширении производства. Интенсивный путь предполагает повышение эффективности производства путем мобилизации внутрихозяйственных возможностей без вовлечения дополнительных средств в хозяйственный оборот.

Оценка влияния экстенсивности и интенсивности использования производственного потенциала может быть реализована с использованием методов факторного анализа на изменение выпуска и продажи продукции [5,6,9].

Базой для анализа могут служить следующие факторные детерминированные модели

$$ВП = Ф \times ФО;$$
$$ВП = М \times МО;$$
$$ВП = Ч \times ПТ,$$

где $ВП$ – выпуск (продажа) продукции, тыс. руб; $Ф$ – среднегодовая стоимость активной части основных производственных фондов, тыс. руб.; $ФО$ – фондоотдача, тыс. руб./ тыс. руб.; $М$ – материальные затраты, тыс. руб.; $МО$ – материалоотдача, тыс. руб./ тыс. руб.; $Ч$ – среднегодовая численность работников, чел.; $ПТ$ – производительность труда, тыс. руб./ чел.

Расчет влияния на приращение выпуска продукции экстенсивности ($\Delta ВП_{Ф}$) и интенсивности ($\Delta ВП_{ФО}$) в использовании основных средств определяется

$$\Delta ВП_{ф} = (Ф_1 - Ф_0) \times ФО_0;$$
$$\Delta ВП_{фо} = Ф_1 \times (ФО_1 - ФО_0).$$

Расчет влияния на приращение выпуска продукции экстенсивности ($\Delta ВП_{Ч}$) и интенсивности ($\Delta ВП_{ПТ}$) в использовании трудовых ресурсов определяется

$$\Delta ВП_{Ч} = (Ч_1 - Ч_0) \times ПТ_0;$$
$$\Delta ВП_{ПТ} = Ч_1 \times (ПТ_1 - ПТ_0).$$

Расчет влияния на приращение выпуска продукции экстенсивности ($\Delta ВП_{М}$) и интенсивности ($\Delta ВП_{МО}$) в использовании материальных ресурсов на приращение выпуска продукции определяется

$$\Delta ВП_{М} = (М_1 – М_0) \times МО_0;$$
$$\Delta ВП_{МО} = М_1 \times (МО_1 - МО_0).$$

По результатам факторного анализа рассчитывается коэффициент экстенсивности использования каждого ресурса как отношение темпа прироста соответствующего вида ресурсов к темпу прироста объема выпуска или продажи продукции. Соответственно, коэффициент

интенсивности использования ресурсов можно определить путем вычитания из 100% значения коэффициента экстенсивности. На стадии обобщения рассчитывается комплексный показатель экстенсивности использования всех ресурсов (как простая средняя арифметическая величина) и комплексный показатель интенсивности использования всех ресурсов [5].

Разложение изменения выпуска продукции на составляющие позволяет проследить всю экономическую цепочку взаимосвязей и выявить слабые или сильные стороны в работе предприятия, рассчитать возможные резервы увеличения выпуска продукции, благодаря интенсивному использованию производственных ресурсов.

Созданию системы ресурсного управления промышленным предприятием посвящена монография коллектива авторов «Ресурсный менеджмент: методы выявления резервов производства» [8].

Уваровой Г. и Анташовым В. [9] было предложено построение матричной модели анализа и оценки производственно-хозяйственной деятельности. Модель отражает сбалансированность развития предприятия, уровень использования производственных ресурсов и влияние их на конечные результаты деятельности. Авторы рассматривают производственный процесс в виде модели «вход-выход». На «входе» задаются значения 7-11 показателей, которые позволяют представить всю экономическую цепочку создания стоимости: материальные затраты, амортизация, фонд оплаты труда, основные фонды, добавленная стоимость и другие. На «выходе» получается более 200 показателей, характеризующих степень сбалансированности развития и использования ресурсов, эффективность управления ресурсным потенциалом, тесноту связи между затратами и ресурсами, между затратами и результатами. Это позволяет выявить признаки неэффективной работы предприятия. Кроме того, модель дает возможность провести сравнительный анализ эффективности работы отдельных предприятий в составе холдинга с учетом различных условий хозяйственной среды.

Стратегический анализ состоит не в том, чтобы дать готовые ответы, а предоставить базу для разработки стратегических решений. Аналитические методы, рассмотренные в статье, позволяют идентифицировать, классифицировать и выделить принципиальные факторы, которые следует учитывать при принятии стратегических решений. Умелое использование стратегического анализа помогает развивать управленческую гибкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вашакмадзе Т. Сравнительный анализ бизнес-моделей компаний // Экономика и жизнь.-2012.- №45.-С.16-17.

2. Грант Р. Современный стратегический анализ. - СПб.: Питер, 2012. - 544 с.
3. Катькало В.С. Эволюция теории стратегического управления. – СПб.: Изд-во «Высшая школа менеджмента»; Изд. дом С-Петерб. гос. ун-та, 2008. - 548с.
4. Ковалев В.В. Финансовый менеджмент: теория и практика. -М.: Изд-во Проспект, 2009.- 1024 с.
5. Комплексный экономический анализ хозяйственной деятельности: Учеб.пособие / М.А. Вахрушина [и др.]; под ред. М.А. Вахрушиной. – М.:Вузовский учебник, 2011. - 463 с.
6. Кордович В.И., Попова О.В. Комплексный экономический анализ хозяйственной деятельности: Учеб. пособие.- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. -136 с.
7. Парфенова М. Д. Модель построения рентабельности инвестированного капитала на основе сбалансированной системы показателей // Финансовая аналитика: проблемы и решения.- 2012.- № 22.- С.33-42.
8. Ресурсный менеджмент: методы выявления резервов производства / В.В. Глухов [и др.]; под ред. В.В. Глухова. - СПб.: Наука, 2012.- 275 с.
9. Уварова Г., Анташов В. Сбалансированная система показателей оценки деятельности предприятия // Экономика и жизнь. -2005.- №28.- С.7.
10. Шеремет А.Д. Комплексный анализ хозяйственной деятельности. Учебник для вузов. - М.: Инфра-М, 2008.- 416 с.
11. Vladimir Kvint. The global emerging market. Strategic Management and Economics.- New York.: Routledge, 2009.

УДК 338.268

С.В. Салкуцан

ПРОВЕДЕНИЕ АУДИТА МАРКЕТИНГА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧЕК-ЛИСТОВ



Сергей Владимирович Салкуцан
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911) 926-7590, E-mail: salkutsan@kafedrapik.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы проведения аудита маркетинга с использованием чек-листов. Показано место аудита маркетинга в системе планирования и управления маркетингом. Рассмотрены способы применения чек-листов в процессе планирования, контроля за проведением и анализа эффективности маркетинговых мероприятий.

Ключевые слова: аудит маркетинга, планирование маркетинга, управление маркетингом, контроль за маркетинговыми мероприятиями, чек-листы.

S.V. Salkutsan

MARKETING AUDIT WITH CHECKLISTS

Sergey V. Salkutsan, St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
e-mail: salkutsan@kafedrapik.ru

Abstract

The questions of the marketing audit conducting on basis of check-lists is considered. The role of the marketing audit in the marketing planning and management within a company is shown. The ways of check-lists method application for planning and controlling of conducting the marketing effort and analyzing the effectiveness are described in detail.

Keywords: marketing audit, marketing planning, marketing management, marketing effort control, check-lists.

В настоящее время маркетинг стал одной из важнейших функций управления предприятием, и может рассматриваться как основа бизнеса,

координирующая все виды деятельности, связанные с товарами и услугами: НИОКР, производство, финансирование, управление запасами и др.

Эволюция маркетинга привела к революционным изменениям в производственном менеджменте (разработаны и внедрены системы оперативного управления MRP II, DRP, Just in Time и т.п.), в логистике (поставка материалов и комплектующих малыми партиями, снижение запасов, создание распределенных запасов, развитием теории цепочек поставок и т.д.). Значительные изменения происходят и в самом производстве, например: внедрение гибких автоматизированных производств (ГАП).

Несмотря на всю значимость маркетинга и обилие экономической литературы по данной теме, большинство руководителей не до конца представляют, чем именно должны заниматься сотрудники отдела маркетинга, как разграничить функции отдела маркетинга и отделов рекламы, продаж и так далее. Одним из инструментов помогающим определиться с функциями маркетинга, понять, что именно делается неправильно, что улучшить или изменить, является аудит маркетинга. В данной статье речь пойдет об одном из инструментов проведения аудита – чек-листах.

Аудит маркетинга – это независимое периодически повторяющееся всестороннее исследование маркетинговой среды, целей, стратегий и деятельности предприятия для выявления проблем и возможностей. Он является отправной точкой процесса управления маркетингом на предприятии (рис. 1). Ответив на вопросы: где сейчас находится предприятие; что можно изменить, улучшить или исправить, руководство может более четко сформулировать цели маркетинга и определить задачи, которые будут реализованы.

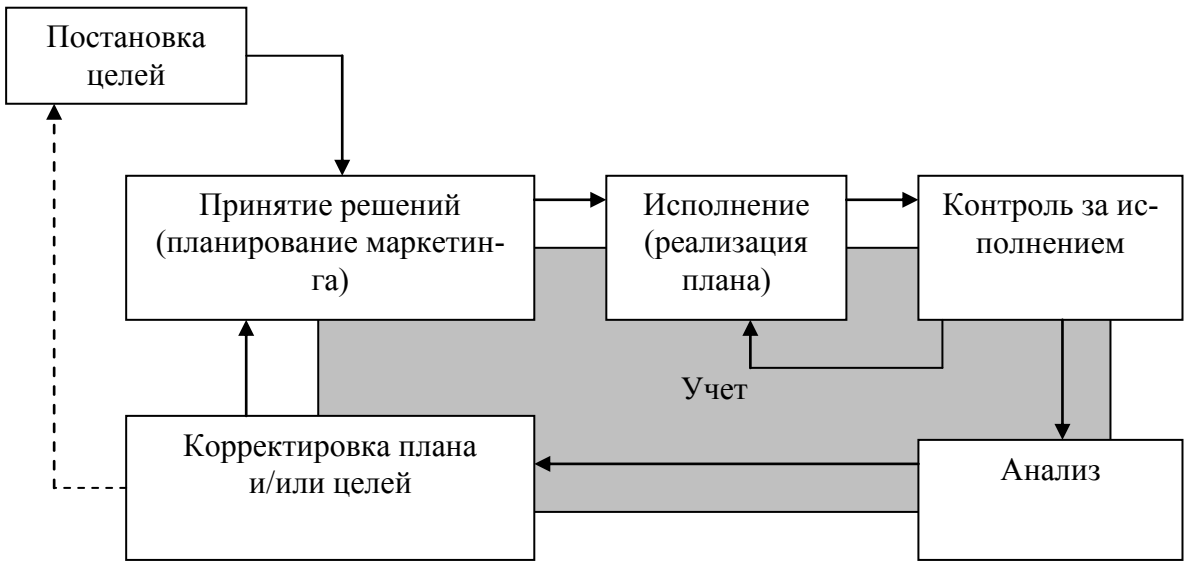


Рис. 1. Управление маркетингом

В современных условиях очень часто предприятия не имеют возможности внедрять у себя полноценный маркетинг. Причин этому множество: нехватка знаний, плохая организация маркетинга, и, конечно, недостаток финансовых ресурсов, который выливается в недостаток квалифицированного персонала, плохую оснащенность их рабочих мест, невозможность привлекать ценные информационные источники. В этом случае цель аудита маркетинга – выявление узких мест, препятствующих расширению доли рынка существующих товаров.

Анализ литературных источников привел к выявлению основного перечня вопросов, на которые аудит маркетинга может дать ответы.

1. На предприятии есть отдел маркетинга, но не до конца понятен его функционал.
2. Нет четкого понимания в вопросах управления ассортиментом.
3. Единственным инструментом увеличения продаж остаются «ценовые войны».
4. Где взять необходимую информацию или как ее использовать?
5. Каким образом планировать финансовые поступления?
6. Насколько эффективно работает торговый персонал?
7. Насколько прибыльны совершаемые сделки?
8. Если компания работает в нескольких регионах страны, то насколько прибыльна ее деятельность в каждом из них, для различных групп клиентов, каналов движения товаров и т.д.?

Основным инструментом проведения маркетингового аудита многие специалисты признают чек-листы. Это свободный инструмент в виде анкеты для самообследования, который позволяет структурировать имеющуюся на предприятии информацию, и провести детальный анализ предприятия, не дублируя процессы и не пропуская важных направлений деятельности. Чек-лист содержит в себе шаблон для самооценки.

Основные способы применения чек-листов:

1. Планирование маркетинговых мероприятий.
2. Осуществление контроля за маркетинговыми мероприятиями.
3. Анализ эффективности проведенных мероприятий.

Каждая из перечисленных задач может быть реализована с помощью различных типов чек-листов (оценками по шкалам, с численными показателями, с дихотомическими оценками).

В процессе планирования маркетинговых мероприятий чек-листы могут использоваться для проведения анализа ситуации на рынке, определения стратегических альтернатив, выбора конкретных маркетинговых мероприятий и т.д. В табл. 1 представлен фрагмент чек-листа для определения конкурентоспособности продукта при проведении анализа рынка.

Таблица 1

Фрагмент чек-листа для определения профиля конкурентоспособности

Параметр	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	Примечание
1. Товарная политика								
Идея продукта (инновационная - устаревшая)								
Рыночная позиция (собственная – заменяемая)								
Степень зависимости от товаров субститутов (высокая – низкая)								
Области использования (многие – одна)								
Качество (высокое – низкое)								
Далее приводятся оценки продукта по другим элементам комплекса маркетинга								

Контроль исполнения плана маркетинга осуществляется формальной проверкой всех запланированных мероприятий (пример такого чек-листа представлен в табл. 2) или фиксированием численных показателей исполнения плана маркетинга основанных на ключевых показателях производительности (KPI), пример представлен в табл. 3.

Таблица 2

Чек-лист проверки выполнения плана проведения выставки

	Да	Нет	Примечание
Менеджер по PR			
Разработка пресс-релиза мероприятия			
Согласование перечня СМИ для публикации			
Разработка пакетов приглашений			
Заключение информационного соглашения в рамках мероприятия			
Разработка сувенирной продукции			
Разработка технического райдера			
Далее перечисление всех закрепленных за менеджером мероприятий из плана маркетинга			

В табл. 3 представлен фрагмент чек-листа по фиксированию численных показателей исполнения плана маркетинга.

Таблица 3

Чек-лист оценки исполнения плана-маркетинга

	Факт	План	Примечание
Доля новых покупателей			
Доля ухода клиентов			
Представленность товара в сети			
Стоимость обслуживания клиента			
Далее перечисляются все ключевые показатели (KPI)			

В заключении хочется отметить, что сами по себе чек-листы являются свободным инструментом, так как не существует жестко формализованных типов и форм сбора данных, это позволяет предприятиям самим разрабатывать и реализовывать на практике данный инструмент аудита маркетинга.

Очень важно научиться разрабатывать чек-листы самостоятельно, этого помогает персоналу понимать суть проблемы и, уже в процессе разработки, вырабатывать стратегические альтернативы и понимать, что именно идет не так.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О.Л. Истомина, С.В. Салкуцан. Проблемы оценки эффективности участия в выставках для B2B рынка // Сборник материалов XXXVIII Неделя науки СПбГПУ. – 2009. – С. 289-291
2. А.И. Климин. Оценка эффективности маркетинговых коммуникаций на основе известности бренда // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 3. – С.166-173
3. В. Кеворков. Как проводится аудит маркетинга в компании? // Индустриальный и b2b маркетинг. – 2011. – № 1. – С. 64-67
4. Р.О. Краснов, С.В. Салкуцан. Изучение модели потребительского поведения с целью формирования комплекса продвижения товара // Маркетинг и маркетинговые исследования. – 2002. – № 3. – С. 43-49
5. О. Михайлов. KPI в отделе продаж // Коммерческий директор. – 2012. – № 11. – С. 90-99
6. Н.А. Морган, Б.Г. Кларк, Р. Гунер. Продуктивность маркетинга, маркетинговый аудит, системы оценки маркетинговой деятельности: комплексное рассмотрение // Маркетинг дайджест. – 2004. – № 6. – С. 61-81
7. Н.В. Павлов. Обобщенная схема решения маркетинговых задач по управлению продуктом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 4. – С. 68-72
8. С.В. Салкуцан. Планирование маркетинговых мероприятий // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – № 1. – С. 95-98

9. И.В. Сочнева, С.В. Салкуцан. Использование трехуровневой модели ценности для исследования услуги, предлагаемой на B2B рынке // Сборник материалов XLI Неделя науки СПбГПУ. – 2012. – С. 457-458
10. Д.В. Тюрин. Маркетинговые аудит как средство повышения результативности маркетинга компании // Менеджмент сегодня. – 2011. – № 6. – С. 322-331

УДК 004.418 + 004.75

М.И. Седлер, Н.П. Егорова

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗАКАЗАМИ ДЛЯ ФАБРИК ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ ОБУВИ



Мария Ильинична Седлер, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург Тел.: (812) 534-0764,
E-mail: msedler@mail.ru



Надежда Петровна Егорова, магистр
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург Тел.: (812) 516-1697,
E-mail: nadezhdaegorova27@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы повышения качества обслуживания заказчиков и планирования производства путем создания автоматизированного клиент-серверного приложения, обеспечивающего совместную работу в сети сотрудников медицинского, планово-экономического отделов и менеджера по маркетингу, автоматизирующее процессы расчета времени выполнения и стоимости заказа, определения потребности в материалах, включающее базу данных заказов.

Ключевые слова: планирование производства, автоматизированная система управления заказами, нормирование трудоемкости, клиент-серверное приложение, база данных заказов.

M.I.Sedler, N.P. Egorova

DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED CLIENT-SERVER APPLICATION OF ORDERS CONTROL FOR THE FACTORIES OF ORTHOPEDIC FOOTWEAR

Maria I. Sedler[1], e-mail: msedler@mail.ru;
Nadezhda P. Egorova[1], e-mail: nadezhdaegorova27@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper deals with improving of customer service, and production planning through the creation of an automated client-server application that provides joint work in the network of staff of medical, economical department and the marketing manager that automates the processes of calculation of the execution time and cost of order, the materials requirement determination, including a database of orders is created.

Key words: production scheduling, automated system of control orders, regulation of labor intensity, the client-server application, the database of orders

Основным направлением деятельности ортопедических фабрик является производство ортопедической, профилактической обуви и ортопедических стелек. Объемы производства наиболее крупных ортопедических фабрик достигают 50 тысяч и более пар обуви в год.

Очень часто фабрика ортопедической обуви имеет дискретный тип производства (изготовление на заказ). Планирование производства и закупок осуществляется в соответствии с поступающими заказами; расчет потребности в материалах, срока заказа, себестоимости и цены заказа, выбор модели и ряда других параметров производится вручную, что сказывается на точности планирования. Поэтому необходимо было создать клиент-серверное приложение, автоматизирующее вышеназванные процессы и повышающее качество взаимодействия с конкретным заказчиком.

Клиент-серверное приложение создано в программе Microsoft Visual Basic 6.0. Информация, необходимая для работы приложения, хранится в таблицах СУБД Visual FoxPro 8.0 - файлы формата .dbf. Прикладные программы написаны с подключением компонентов ActiveX Data Object (ADO), позволяющих программе получить доступ к таблицам базы данных Visual FoxPro 8.0 с помощью провайдера OLE DB. Также в качестве входных данных используется информация, имеющаяся на предприятии в электронном виде, представленная файлами различных форматов.

Клиент-серверное приложение управления заказами состоит из трех блоков (рис. 1). Клиентами приложения являются автоматизированные рабочие места работников медицинского, планово-экономического отделов и менеджера по маркетингу. В приложении предусмотрена система паролей для разграничения прав доступа пользователей. Пароли пользователей хранятся в таблице базы данных на сервере. Для обслуживания приложения предусмотрен администратор сети, имеющий полный доступ к информации.



Рис. 1. Состав приложения

Взаимодействие между блоками приложения осуществляется по принципу клиент-серверной архитектуры. Схема процесса выполнения заказа представлена на рис. 2.

Производство изделий из кожи делится на следующие основные этапы: раскрой, предварительная обработка деталей, скрепление, формование, механическая и физико-химическая отделка. Технологический процесс изготовления изделия строится, исходя из выбранной модели.

Для расчета времени выполнения заказа были определены нормы технологических операций и установлено, что наиболее трудоемкой является операция сушки обуви. Поэтому расчет срока выполнения заказа осуществляется на основании нормы длительности операции сушки, с учетом заказов, запущенных в производство. Таким образом, цикл заказа изготовления одной пары обуви без ожидания в очереди составляет 8,4 часа.

Пользователями Блока I приложения являются сотрудники медицинского отдела, осуществляющие прием заказа с занесением информации в базу данных. После внесения данных программа осуществляет автоматический расчет даты выполнения заказа. В качестве исходных данных для расчета является информация о запущенных в производство заказах и норма длительности операции сушки. Выходной информацией Блока I является документ наряд-заказ – файл MS Word.

Для входа в программный модуль приложения сотрудники медицинского отдела должны ввести логин и пароль на форме «Вход в систему».

Если логин и пароль введены правильно, программа осуществляет переход на форму «Главное меню», откуда осуществляется переход либо на форму просмотра существующих заказов, либо запускается процесс принятия нового заказа.

После нажатия на кнопку «Принять новый заказ» программа осуществляет переход на форму «Ввод данных о заказчике» (рис. 3), предназначенную для ввода данных в таблицу заказов Vsezapisi.dbf. Порядковый но-

мер новому заказу присваивается автоматически, путем сложения предыдущего номера заказа и единицы.



Рис. 2. Схема процесса выполнения заказа

Для ввода данных о заказываемом изделии создана форма «Ввод данных об изделии», осуществляющийся путем выбора информации из справочных таблиц, предназначенных для выбора модели соответствующей заданным критериям: Diagnoz.dbf – перечень диагнозов, Pol.dbf – таблица полов, Sezon.dbf – таблица с перечнем сезонов, Colours.dbf – таблица возможных цветов верха обуви.

После ввода всех параметров осуществляется переход на форму «Выбор модели» (рис. 4). На этой форме заказчику предоставляется возможность просмотреть все возможные варианты, соответствующие заданным

параметрам и произвести окончательный выбор модели. Для этого в программе написан параметрический запрос.

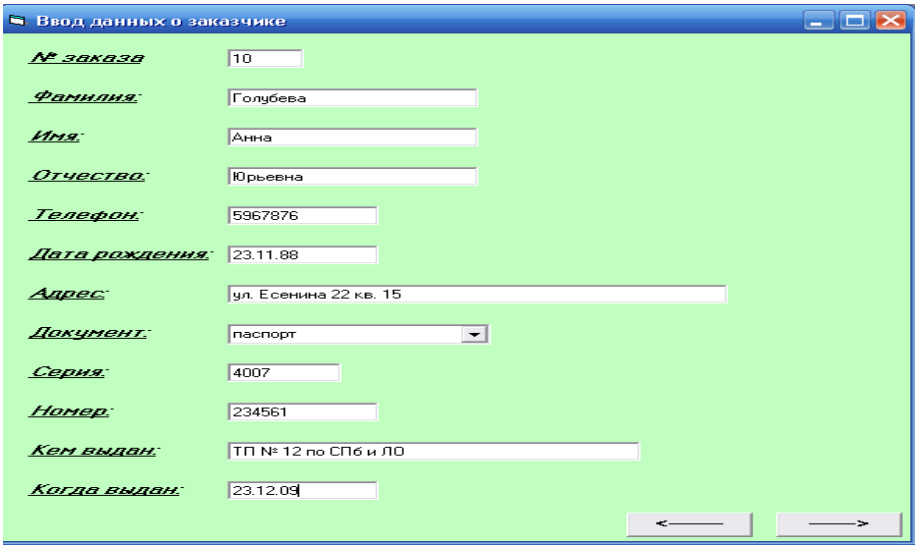


Рис. 3. Форма «Ввод данных о заказчике»

После выбора модели обуви с ноги заказчика снимаются мерки и заносятся в текстовые поля формы «Мерки» (рис. 5), связанные с соответствующими полями таблицы базы данных Merki.dbf.

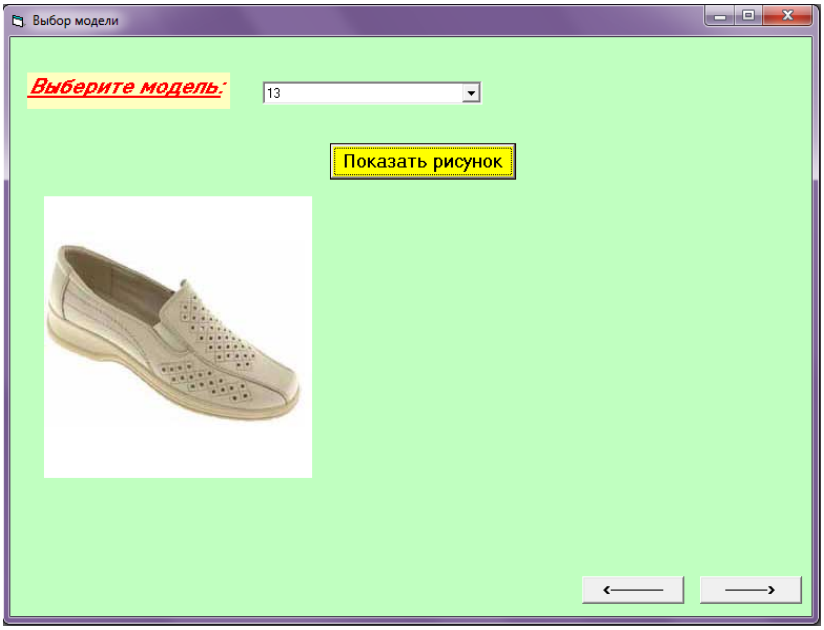


Рис. 4. Форма «Выбор модели»

Далее программа определяет дату выполнения заказа путем прибавления времени, необходимого на его выполнение, к планируемой дате завершения ранее принятых заказов.

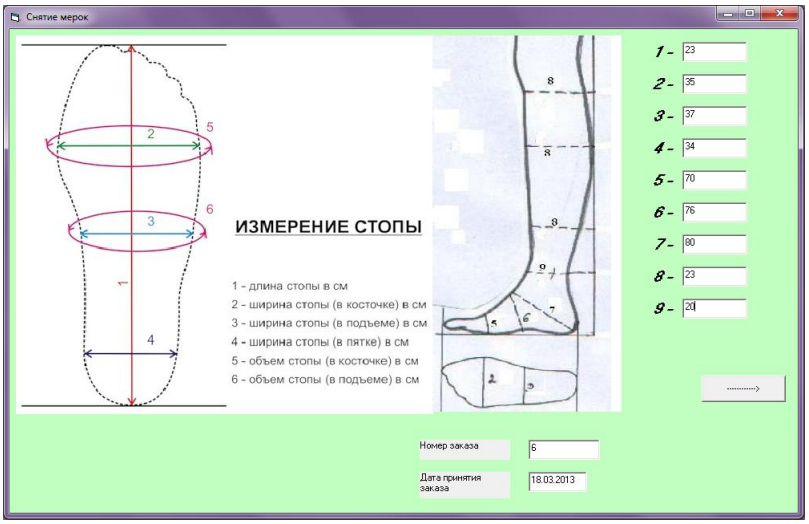
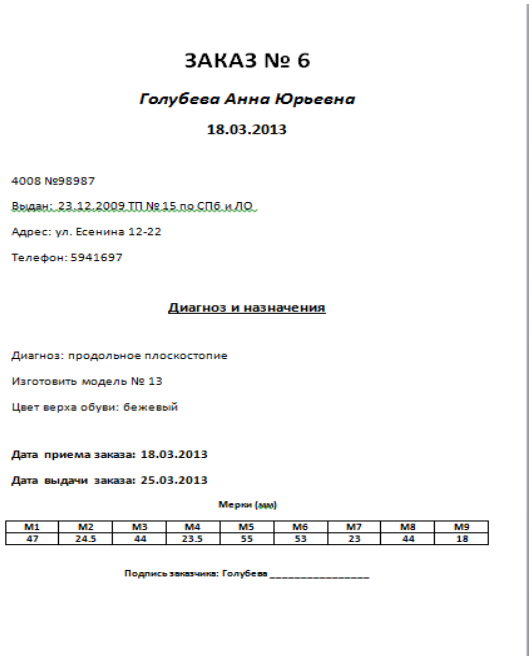


Рис. 5. Форма «Мерки»

Далее в MS Word автоматически формируется выходной документ наряд-заказ путем импорта данных о заказе из записи таблицы Vsezapisi.dbf. Для этого осуществляется переход к форме «Наряд-заказ», из которой по нажатию кнопки «Сформировать наряд-заказ» и происходит формирование документа «Наряд-заказ».doc (рис. 6).



ЗАКАЗ № 6

Голубева Анна Юрьевна

18.03.2013

4008 №98987

Выдан: 23.12.2009 ТП № 15 по СПб и ЛО

Адрес: ул. Есенина 12-22

Телефон: 5941697

Диагноз и назначения

Диагноз: продольное плоскостопие

Изготовить модель № 13

Цвет верха обуви: бежевый

Дата приема заказа: 18.03.2013

Дата выдачи заказа: 25.03.2013

Мерки (мм)

M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
47	24.5	44	23.5	55	53	23	44	18

Подпись заказчика: Голубева _____

Рис. 6. «Наряд-заказ»

Блок II предназначен для автоматизации процессов расчета потребности в материалах, себестоимости изделия и стоимости заказа. Пользователями программы являются сотрудники планово-экономического отдела. Исходной информацией блока II является информация таблиц «Нормы расхода материалов», «Справочник материалов» СУБД «1С 7.7» - «1С:

Предприятие» (рис. 7) и информация таблиц базы данных заказов - файлы формата .dbf.

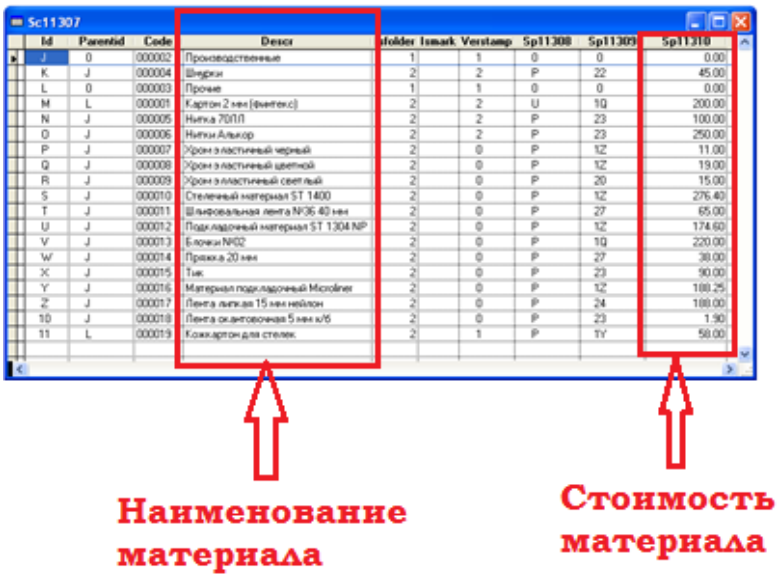


Рис. 7 «Справочник материалов» СУБД «1С 7.7»

Для получения выборки необходимых данных из справочных таблиц СУБД «1С 7.7» - «1С: Предприятие» и таблиц базы данных заказов в СУБД Visual FoxPro 8.0 написаны SQL-запросы. Эти данные используются для расчета «полной» потребности в материалах, необходимых для выполнения поступивших заказов. Затем производится автоматический расчет «чистой» потребности в материалах с учетом остатков находящихся на складе предприятия (рис. 8).

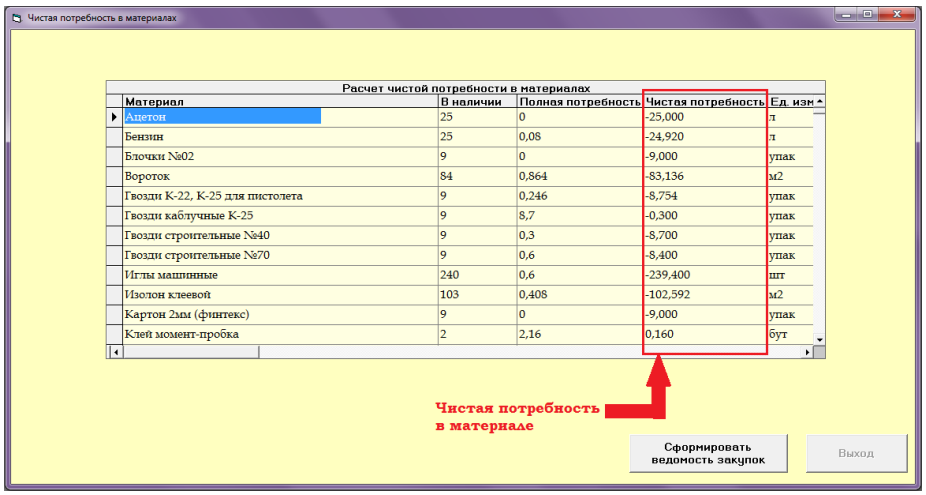


Рис. 8. Форма «Чистая потребность в материалах»

Также автоматически происходит расчет себестоимости изделия и стоимости заказа.

В результате работы Блока II приложения автоматически формируется

выходной документ «Ведомость закупок» - файл MS Excel (рис. 9).

Ведомость закупок от 18.03.2013

Наименование материала	Чистая потребность	Единица измерения
Клей полихлорпреновый наиритовый Арагац	5,5	бут
Клей резиновый Uniflex 697, ATS 443R	3,4	бут
Кожкартон для стелек	769,5	л.
Лента киперная 20 мм х\б	1875	боб
Лента контактная (велкро)	2922,2	рул
Лента липкая 25 мм нейлон	617,5	рул
Лента липкая 5 мм нейлон	307	рул
Стелечный материал ST 1404	516,5	м2
Супертекс 30, 86 ЛЛ	4088	пог.м
Тик	117,02	пог.м
Шлифовальная лента №16	1192	шт
Шлифовальная лента №36 100 мм	662	шт
Шлифовальная лента №36 40 мм	671	шт

Рис. 9. Ведомость закупок

Блок III предназначен для выявления моделей, пользующихся повышенным спросом и анализа продаж. Пользователями программы является менеджер по маркетингу. Исходной информацией блока III является информация таблицы «База данных заказов» - файл формата .dbf. Выходной информацией блока I является документ график продаж - файл MS Excel

Для формирования графика продаж на форме «Выбор периода» пользователю следует указать период, за который будет происходить формирование графика продаж.

По нажатию кнопки «Сформировать график продаж» происходит формирование выборки данных, автоматическое создание файла MS Excel, перенос в него данных SQL-запроса, построение графика продаж за указанный период и сохранение файла в корневом каталоге компьютера менеджера по маркетингу под именем, соответствующем выбранному периоду (рис. 10).

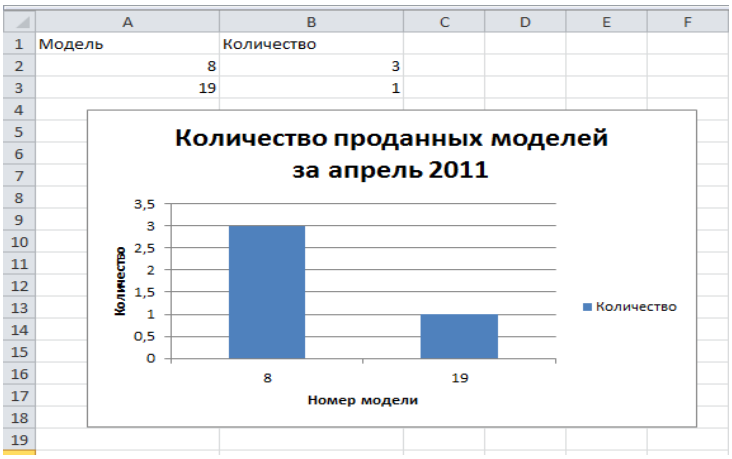


Рис. 10. График продаж

Заключение

В результате проделанной работы выполнено следующее:

- оценена существующая методика обслуживания заказчиков;
- проведен анализ загрузки технологического оборудования;
- создана база данных для хранения информации о заказах;
- создано программное приложение для автоматизации процесса приема заказов, расчета времени выполнения заказа в зависимости от загрузки оборудования, себестоимости и цены заказа (выбрана программная среда разработки, созданы алгоритмы, написаны прикладные программы, создан удобный пользовательский интерфейс в виде набора взаимосвязанных экранных форм, разработана инструкция пользователя);

Внедрение автоматизированного приложения обеспечивает улучшение качества обслуживания заказчиков, снижение трудоемкости обработки информации и, за счет оптимизации загрузки оборудования, повышение эффективности производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9289-78 «Обувь. Правила приемки».
2. ТУ 8820-037-53279025-2004 «Ортопедическая обувь».
3. Ильенкова С. Д., Ильенкова Н. Д., Бандурин А. В. Управление качеством - Москва: ЮНИТИ, 2008. – 456 с.
4. Хальворсон М. Microsoft Visual Basic 6.0 для профессионалов. Шаг за шагом: Самоучитель разработчика программного обеспечения: Пер. с англ./М. Хальворсон. – Москва: ЭКОМ, 2007. – 716 с.
5. Шув И.И. Общая технология обуви - Москва: Академия, 2007. – 180 с.
6. Островитянов Э.М. Технология обуви - Москва, 2006. – 200 с.
7. Довнич И. И. Технология производства обуви - Москва: Академия, 2006. – 288 с.
8. Фатхутдинов Р.А. Организация производства - Москва: ИНФРА-М, 2009. – 377 с.
9. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы — СПб: Питер, 2011. – 620 с.
10. Карпова Т.С. Базы данных: модели, разработка, реализация — СПБ: Питер, 2011. – 350 с.

УДК 621.9

Д.И. Троицкий

КОНФЛИКТЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ИНТЕРЕСОВ ПРИ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА



Дмитрий Игоревич Троицкий, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВПО "Тульский государственный университет"
пр. Ленина, 92, Тула, 300012, Россия.
Тел.: (903)8442800, E-mail: dtroitsky@gmail.com

Аннотация

В данной статье решается задача повышения эффективности и качества процессов автоматизированной конструкторско-технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе предотвращения конфликтов профессиональных интересов между исполнителями данных процессов на основе применения модели проектного решения, обеспечивающей прогнозирование параметров технологичности и логистического риска на этапе конструкторского проектирования, а также обеспечивающей достоверность формального представления проектного решения.

Ключевые слова: конфликт профессиональных интересов; трудоемкость; логистический риск; жизненный цикл изделия

D.I. Troitsky

PROFESSIONAL CONFLICTS IN PRODUCT DESIGN AND ENGINEERING PROCESSES

Dr. Dmitry I. Troitsky, e-mail: dtroitsky@gmail.com.
Tula State University, Lenin pr., 92, Tula, 300012, Russia

Abstract

The paper considers the problem of efficiency and quality enhancement in computer-aided product development and manufacturing based on the professional conflicts prevention between the experts in different domains using a design solution model concept. The model enables manufacturability and logistical risk evaluation at the design stage and also ensures the design decision's validity.

Key words: professional conflict; machining time; logistical risk; product lifecycle management.

Введение. В настоящее время практически все основные процессы жизненного цикла изделия (ЖЦИ) автоматизированы при помощи CAD/CAE/CAM/PLM-решений. Однако вопросы эффективности и оптимальности взаимодействия между участниками конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) требуют дальнейшего исследования. Недостаточный уровень рассмотрения таких проблем, как неизбежно возникающие при этом конфликты профессиональных интересов приводит к росту сроков выполнения подготовки производства и снижению ее эффективности.

Понятие конфликта профессиональных интересов (КПИ) не несет негативного оттенка и является объективным конфликтом не двух личностей, а двух исполнителей процесса, в отличие от классического понимания конфликтов в конфликтологии. При последовательном выполнении этапов ЖЦИ последующие этапы неизбежно базируются на информации, созданной на предыдущем этапе. Например, технологическое проектирование и закупка исходных материалов производятся на основе конструкторской документации на изделие. При этом последующие участники оценивают предлагаемое проектное решение и, если такая оценка не удовлетворяет установленным требованиям, возникает конфликт. Как правило, его устранение требует неоднократных итераций процессов ЖЦИ, что приводит к необоснованным временным, трудовым и финансовым затратам. В итоге, как правило, конфликт разрешается путем внесения изменений в проектное решение, так как предъявляемые к изделию требования по себестоимости (и, соответственно, по технологичности, материалоемкости и т.д.) определяются заказчиком и ситуацией на рынке продукции и не могут быть произвольно изменены самим предприятием.

Переход к автоматизированному проектированию требует расширенного понимания термина "конструкторская документация", так как в современных условиях, как правило, речь идет о модели проектного решения (МПР) — наборе 3D-моделей с многочисленными дополнительными атрибутами.

Для оценки уровня автоматизации процессов подготовки производства, производительности труда пользователя САПР и возможности дальнейшего использования модели необходима методика определения объема содержащейся в МПР информации. На основе этой информации возможна разработка функциональных и математических моделей определения производных параметров проектного решения (уровня технологичности, материалоемкости, логистического риска), которые предоставляют разработчику решения обратную связь и позволяют модифицировать решение таким образом, чтобы указанные параметры не выходили за пределы, заданные последующими участниками процесса КТПП.

Таким образом, при наличии полноценной информационной модели проектного решения и создании моделей и алгоритмов ее оценки стано-

вится возможным предотвратить возможные КПИ благодаря устранению самого повода для возникновения конфликта, что позволит решить актуальные проблемы отечественного машиностроения: сокращение сроков и повышение эффективности процессов автоматизированной подготовки производства, а также повышение качества проектных решений.

Постановка задачи. Решается задача повышения эффективности и качества процессов автоматизированной конструкторско-технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе предотвращения конфликтов профессиональных интересов между исполнителями данных процессов на основе применения модели проектного решения, обеспечивающей прогнозирование параметров технологичности и логистического риска на этапе конструкторского проектирования, а также обеспечивающей достоверность формального представления проектного решения.

На протяжении жизненного цикла изделия реализуются различные проектные процедуры, выполняемые различными исполнителями. В силу последовательного характера жизненного цикла результаты выполнения *i-1*-го этапа становятся исходными данными при выполнении *i*-го этапа. Это приводит к зависимости последующих исполнителей от результатов деятельности предыдущих. Если *i*-й исполнитель считает результаты деятельности одного или нескольких исполнителей из множества *1...i-1* неудовлетворительными, это приводит к возникновению конфликта профессиональных интересов. Предлагается следующее определение КПИ:

КПИ – объективное противоречие, возникающее в ходе производственной деятельности акторов (участников конфликта) и вызванное различными целями деятельности акторов, а также их взаимозависимостью при принятии решений.

Рассматривается конфликт между акторами A_{i-1} и A_i, где i – порядковый номер выполняемой актором функции в ЖЦИ. В общем виде функция актора сводится к выбору конкретного проектного решения в фазовом пространстве поиска *SS*. Пространство *SS* имеет *n* координат, соответствующих переменным параметрам проектного решения. При этом на конфигурацию пространства накладываются ограничения, которые можно классифицировать следующим образом:

Ограничения 1 рода (*L1*)— объективные

Ограничения 2 рода (*L2*) — функциональные

Ограничения 3 рода (*L3*) — связи жизненного цикла

Тогда в пространстве *SS* выделяется подмножество допустимых решений *Sso*:

$$SSo=SS-L1-L2-L3 \qquad (1)$$

Очевидно, что ограничения 1 рода не приводят к возникновению КПИ. Ограничения 2 рода также не приводят к возникновениям конфликтов, так как они не являются результатом деятельности других акторов, а выявляются расчетным или экспериментальным путем.

Наибольший интерес представляют ограничения 3 рода. Учет таких ограничений приводит к тому, что i+1 актор вынужден действовать в фазовом пространстве (1…i) акторов, так как в них заданы исходные параметры для выполнения i+1-й проектной процедуры. При этом необходимо, чтобы пространства поиска *SSo (i-1)* и *Sso(i)* имели общую область. Следует отметить, конфигурация пространства *Sso(i)* задается с учетом ограничений 3 рода, накладываемых конкретным проектным решением P_{i-1}, принятым на i-1-м этапе. Принятие проектного решения означает выбор конкретного множества параметров фазового пространства поиска, т.е.

$$P_{i-1}=<p1, p2, \ldots p_n>, \quad (2)$$

где n – число координат фазового пространства *SSo*;

p_i – i-я координата.

Условием наличия общей области является:

$$Sso(i-1)\cap Sso(i)\neq\varnothing \quad (3)$$

Если данное условие не выполняется, то КПИ в принципе неразрешим, так как накладываемые на конфигурацию пространств *SSo(i-1)* и *Sso(i)* ограничения противоречат друг другу.

Если же условие выполняется, то возможны два сценария: i-*1*-е проектное решение принадлежит или не принадлежит общей области. Первый случай, описывается соотношением:

$$P_{i-1}\in Sso(i-1)\cap Sso(i), \quad (4)$$

а второй – соотношением

$$P_{i-1}\notin SSo(i-1)\cap Sso(i) \quad (5)$$

Очевидно, что при выполнении условия (4) конфликт не возникает, так как проектное решение P_{i-1} попадает в область допустимых решений i-го актора. В противном случае оказывается, что решение, допустимое с точки зрения i-*1*-го актора, оказывается неприемлемым для i-го актора, что и приводит к возникновению КПИ.

Идеальным вариантом будет соблюдение условия (4) на всех этапах жизненного цикла. Чтобы условие (4) соблюдалось, i-*1*-й актор при принятии решения должен учитывать последствия данного решения с точки зре-

ния последующих акторов. Очевидно, что у предыдущих акторов имеет место нехватка информации для такого учета или, иначе говоря, высокая энтропия информации, представляющей собой проектные решения. Поэтому увеличение информационной насыщенности проектного решения и снижение его энтропии до определенного уровня является способом не только разрешения, но и предотвращения возникновения КПИ.

Любое конструкторско-технологическое проектное решение изначально возникает как замысел его разработчика, который должен быть представлен в виде некоторой формализованной модели, содержащей геометрическое определение объекта (3D-модель) и связанную с ним атрибутивную информацию (так называемая PMI, product and manufacturing information: размерные и геометрические допуски, свойства материала, шероховатости поверхностей и пр.)

Выявлено, что атрибуты такой модели подразделяются на атрибуты 1-го и 2-го рода.

Атрибуты 1-го рода задаются разработчиком, исходя из задания на проектирование, личного опыта, стандартов, нормативных требований и т.д. привязка подобных атрибутов к геометрической 3D-модели поддерживается в современных CAD-системах высокого уровня. Наличие данных атрибутов повышает информационную насыщенность проектного решения и снижает его энтропию. Однако для решения задачи предотвращения КПИ необходимо ввести более общую научную категорию "модель проектного решения", в которой присутствуют атрибуты 2-го рода: информация, необходимая для оценки проектного решения на последующих этапах ЖЦИ [7]. К ней в первую очередь относятся уровень технологичности, уровень логистического риска и уровень достоверности самой модели проектного решения.

Введем следующее определение модели проектного решения (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**):

МПР — информационная модель, содержащая сведения о геометрии проектируемого объекта, атрибуты 1-го рода с их привязкой к элементам геометрии, алгоритмы определения значений атрибутов 2-го рода и необходимую для такого определения дополнительную информацию (нормативно-справочные данные, статистические сведения по предприятию и пр.)

В настоящем исследовании рассматриваются следующие атрибуты 2-го рода:

A21 – трудоемкость, мин.;

A22 – комплексный показатель уровня логистического риска, [0..1];

A23 – уровень достоверности МПР, [0..1].

В общем виде модель конструкторского проектного решения можно представить как кортеж вида

$$МПР=<G, R, A1, A2> \quad (6)$$

где *G* – множество элементов геометрии;
R – множество взаимосвязей между геометрическими элементами;
A1 – множество атрибутов 1-го рода;
A2 – множество атрибутов 2-го рода.

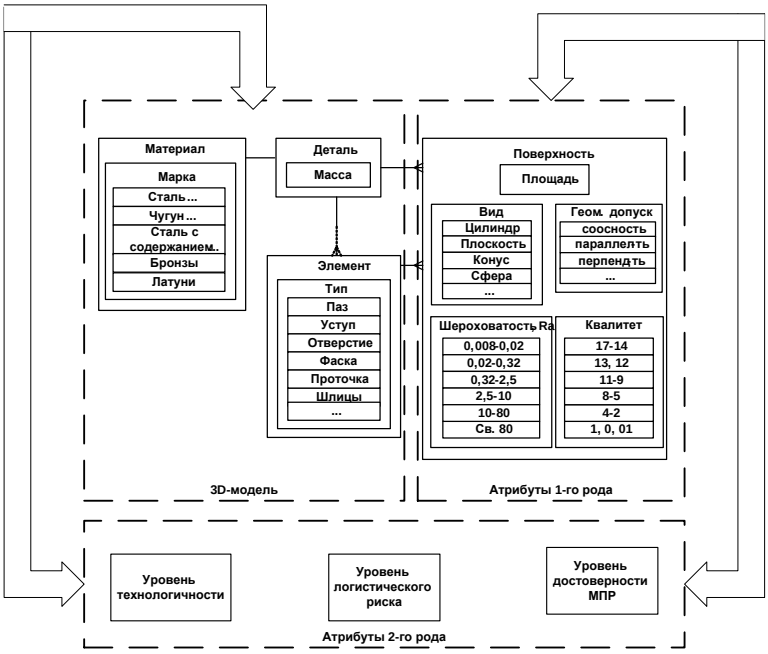


Рис. 1. Модель проектного решения

Оценка конструктивной сложности деталей. В соответствии с концепцией PLM (управления жизненным циклом) проектное решение можно рассматривать как динамическую систему, к которой применимы положения теории информационной энтропии. Под информационной энтропией в общем случае понимается мера неопределенности информации. Для численной оценки энтропии ПР, помимо указанных коэффициентов, необходимо оценить объем информации, содержащейся в компонентах модели. Для конструкторского проектного решения затруднительно применить классический подход Шеннона, основанный на устранении неопределенности путем выбора из ограниченного множества (в пределе двух) вариантов. К тому же сложность проектного решения, которая в конечном итоге и определяет объем содержащейся в нем смысловой информации (семантическая мера информации), не имеет прямой корреляции с объемом описательной информации (синтаксическая мера). Поэтому для количественной оценки семантического объема информации *V* в МПР необходима оценка сложности проектного решения. Кроме того, такая оценка необходима для определения себестоимости процесса разработки, учета трудозатрат конструкторов, выявления уровня технологичности деталей, решения разнообразных задач планирования и распределения ресурсов [4]. Особенную

важность данная оценка имеет при вариантном типе производства, отличающемся мелкосерийным и единичным выпуском сильно отличающих по конструкции изделий.

С конструктивной точки зрения сложность отдельной поверхности C_i зависит прежде всего от степени ее кривизны Cur (плоская, одинарной кривизны, двойной кривизны), а также от объема дополнительной атрибутивной информации A, привязанной к данной поверхности согласно ГОСТ 2.052-2006. Кроме того, каждая поверхность входит в тот или иной конструктивный элемент (feature) детали. Для учета сложности элементов следует принимать во внимание число поверхностей N, смежных с рассматриваемой. Чем их больше, тем с более геометрически сложным элементом мы имеем дело. Тогда:

$$C_i = f(Cur, A, N) \tag{7}$$

Соответственно сложность всей детали, состоящей из n поверхностей, рассматривается как приведенная сумма сложностей каждой поверхности:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{n} \tag{8}$$

Конкретный вид функции (7) должен учитывать следующие соображения:

Сложность конструктивного элемента, в который входит деталь (параметр N) имеет высокий относительный приоритет, т.к. является свойством объекта более высокого уровня, чем отдельная поверхность.

По мере роста степени кривизны сложность возрастает нелинейно.

Атрибутивная информация содержит различный объем данных: геометрический допуск более информационно насыщен, чем указание на шероховатость или размерный допуск поверхности.

Тогда можно предложить следующий вид функции (7):

$$C = f_1(cur) + N^2 + T_{\dim} + T_{geom}{}^3 + R, \tag{9}$$

где

$f_1(Cur) = \begin{cases} 1, Cur = 1 \\ 2, Cur = 2 \\ 8, Cur = 3 \end{cases}$ - функция, возвращающая коэффициент, нелинейно учитывающий степень кривизны поверхности;

N - число сопряженных поверхностей. Квадратичная зависимость введена для усиления влияния данного параметра;

$T_{\dim}$ - число размерных допусков, проставленных на поверхности;

T_{geom} - число геометрических допусков, проставленных на поверхности. Кубическая степень введена для отражения того факта, что геометрический допуск содержит в три раза больший объем информации (величина допуска, его тип и ссылку на базовую поверхность), чем размерный;

R - коэффициент, учитывающий наличие атрибута шероховатости поверхности.

Отдельного рассмотрения требует такой конструктивный элемент, как резьба. По сути это поверхность двойной кривизны, однако традиционно в 3D САПР точное построение геометрии резьб не выполняется, а применяется условное обозначение. В связи с этим предлагается рассматривать резьбу как частный случай цилиндрической или конической поверхности (одинарной кривизны) с некоторым коэффициентом увеличения сложности.

Проанализирована взаимосвязь между уровнем сложности и расчетной трудоемкостью изготовления детали, показано наличие устойчивой корреляции [9]. Кроме того, установлено, что значительные (свыше 15%) расхождения между уровнем сложности и нормированной трудоемкостью чаще всего свидетельствуют об ошибке в определении трудоемкости, что позволяет использовать параметр конструктивной сложности как инструмент контроля качества технологического проектного решения.

Оценка значений атрибутов 2-го рода. Рассмотрим подходы к определению значений атрибутов 2-го рода. Для оценки уровня технологичности предлагается использовать показатель трудоемкости изготовления [5, 10] и применить разработанную автором модель ее определения на основе анализа расширенной 3D-модели детали [1]. Уровень логистического риска показывает вероятность невыполнения производственного задания по причине отсутствия необходимых для производства материалов. Разработанная автором модель прогнозирования уровня логистического риска представлена в работе [2]. Кроме того, в соответствии с теорией информации при ее передаче по каналу связи "замысел конструктора → модель проектного решения" неизбежно происходит воздействие помех, искажающих семантику сообщения. Уровень этих помех складывается из объективной составляющей, зависящей от выбранного способа представления МПР, и субъективной составляющей, зависящей от квалификации, опыта, внимательности и пр. разработчика. В целом корректность ПР выявляется в ходе процессов контроля. Так как фактически контролируется не само ПР, а его модель, то особую важность приобретает нормоконтроль [8]. Поэтому численно уровень достоверности МПР представить как число выявленных несоответствий, отнесенное к сложности *G*. Вопрос выбора оптимальной стратегии нормконтроля рассматривался автором в работе [3].

Показано, что наличие атрибутов 1-го и 2-го рода в МПР снижает энтропию проектного решения до уровня, гарантирующего предотвращение

наиболее часто встречающихся КПИ. При принятии решения о разработке изделия в зависимости от свойств заказа (срочность, вид заказчика, объем выпуска и пр.) руководство предприятия назначает нормативные значения атрибутов 2-го рода для данного проекта. Например, в оборонной промышленности наличие на предприятии представителя заказчика как еще одного участника процесса контроля качества конструкторской документации повышает важность атрибута "уровень достоверности" [6], а жесткие сроки выполнения заказа повышают важность атрибута "технологичность". В итоге разработчик МПР при помощи представленных в диссертационной работе моделей и алгоритмов самостоятельно оценивает значения атрибутов 2-го рода, и сравнивает их с нормативными:

$$\begin{aligned} &(\ A21 < \text{нормативный уровень трудоемкости}) \vee \\ &(\ A22 < \text{нормативный уровень логистического риска}) \vee \\ &(\ A23 > \text{нормативный уровень достоверности}) \end{aligned} \qquad (10)$$

и при необходимости самостоятельно принимает решение о корректировке МПР. Выполнение условия (10) позволяет устранить КПИ.

Заключение. В работе решена задача применения основных оценок качества модели проектного решения с целью предотвращения конфликтов профессиональных интересов в ходе конструкторско-технологической подготовки производства изделий машиностроения. Предложенные модели были реализованы и внедрены на ряде предприятий и позволили достичь повышения качества проектных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

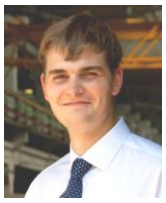
1. Троицкий Д.И. Интегрированная конструкторско-технологическая модель детали как средство оценки трудоемкости ее изготовления. // Вестник компьютерных и информационных технологий. №1, 2006. С. 22-25
2. Троицкий Д.И. Выбор стратегий формирования размерного ряда металлопроката в заготовительном производстве // Заготовительные производства в машиностроении. №5, 2006. с. 50-53
3. Иноземцев А.Н., Григорьева Н.С., Троицкий Д.И. Роль нормоконтроля в управлении качеством конструкторской документации // Стандарты и качество, №12, 2004. С. 46-50
4. Шарин Ю.С., Якимович Б.А., Толмачев В.Г., Коршунов А.И. Теория сложности: монография. — Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1999. — 132 с.
5. Ковешников В.А. Оценка трудоемкости обработки деталей на металлорежущих станках: / В.А. Ковешников, Н.Н. Трушин. // Автоматизация и современные технологии. — 2003. №10. С. 36-40

6. Кохановский В.Д., Дзюман-Грек Ю.Н. Конструкторский контроль чертежей. — М.: Машиностроение, 1988. — 232 с.: ил.
7. Новикова М.В., Троицкий Д. И. Интегрированная конструкторско-технологическая модель детали как средство оценки трудоемкости ее изготовления // Вестник компьютерных и информационных технологий, №1, 2006. — С. 22-25.
8. Григорьева Н.С., Иноземцев А.Н., Троицкий Д.И. Управление персоналом для обеспечения качества конструкторской документации // Методы менеджмента качества, №12, 2003. — С. 46-51
9. Троицкий Д.И. Количественная оценка сложности машиностроительных деталей // Оборудование и инструмент для профессионалов. №3, 2011. с. 62-65
10. Troitsky D.I., Inozemtsev A.N., Novikova M.V. Manufacturability Analysis in Intelligent CAD Systems // 10th International Conference *Computer Graphics and Artificial Intelligence*. Proceedings of the Conference. Athens, Greece, 2007. Pp. 295-298

УДК 621.01

В.Н. Череватенко

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОИНДЕКСНЫХ МАССИВОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРОМЫШЛЕННОГО РЫНКА



Виталий Николаевич Череватенко, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (951)672-1224, E-mail: vitalii@cherevatenko.com

Аннотация

В работе рассмотрен вопрос использования многоиндексных массивов в качестве математического инструмента описания структуры промышленного рынка. Показана возможность программного применения данного инструмента в рамках разработки модели сегментирования рынка, а также отмечены примеры его использования в пакете MathCad.

Ключевые слова: сегментирование рынка, структура рынка, многоиндексный массив.

V.N. Cherevatenko

THE USE OF MULTY-INDEX ARRAYS AS A DESCRIPTION OF THE MARKET STRUCTURE

Vitaly N. Cherevatenko, e-mail: vitalii@cherevatenko.com
St. Petersburg State Polytechnical University

Abstract

The article is devoted to the multi-index arrays as a description of the structure of the industrial market. The paper considers the possibility to use the tool in a model of market segmentation and examples of its use in MathCad.

Key words: market segmentation, market structure, multi-index array.

Формирование стратегии продвижения организации на рынке без понимания его структуры зачастую заканчивается неудачей. В данном случае подразумевается, что понятие структуры рынка неразрывно связано с набором сегментов и непосредственно понятием сегментирования рынка. В работе рассматривается вопрос разработки модели рынка и ее математического описания при помощи многоиндексных массивов.

Рынок – это изменчивый, динамичный объект. Для того, чтобы организации правильно подстроиться под него, необходимо периодически производить ресегментацию. В идеале она должна производиться регулярно, совместно с этапами оценки рыночной ситуации. Пользуясь абстрактным представлением рынка [9], необходимо получить удобный математический инструмент для совместного анализа всех возможных подходов к делению рынка на сегменты. В рамках этой задачи в работе рассматривается структура модели взаимодействия организации - поставщика продукции и рынка, представленная на рис. 1.

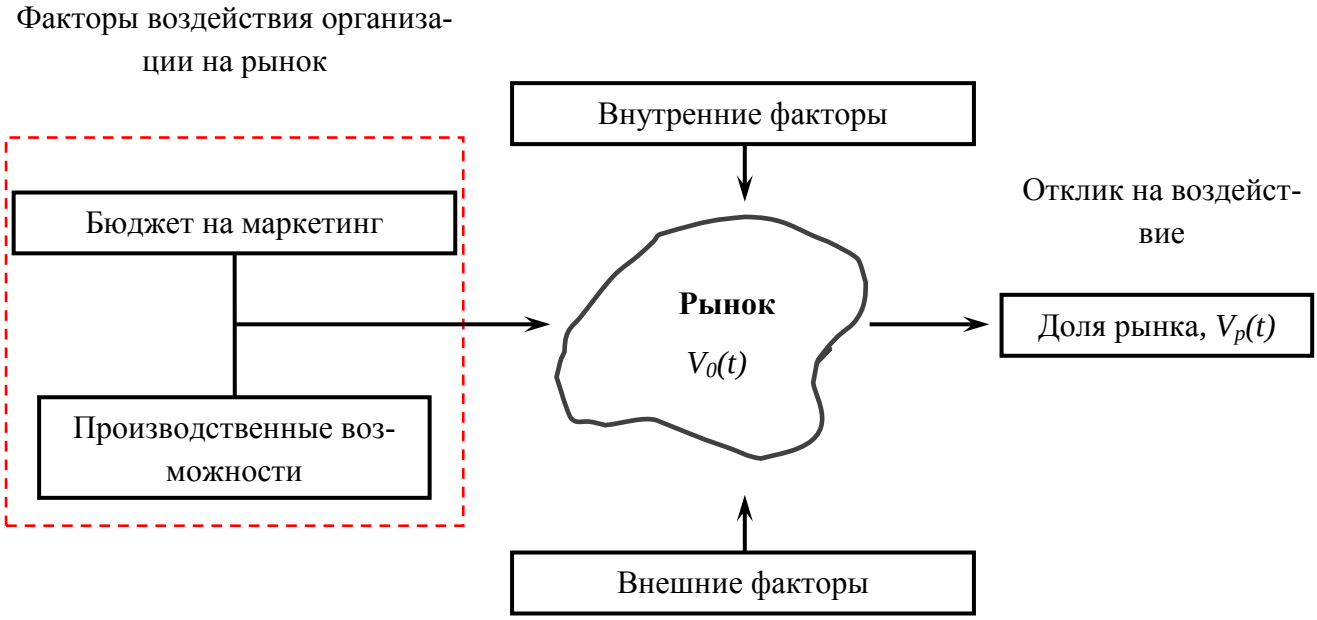


Рис. 1. Структура модели взаимодействия организации-поставщика и рынка

Модель рассматривает процесс воздействия организации на рынок, результат воздействия отражается в качестве доли рынка $V_p(t)$, которая может изменяться в зависимости от тех или иных факторов. Подразумевается, что источники воздействия на рынок имеют две природы – непосредственно зависящие от потенциала компании (бюджет маркетинга и производственные возможности, способные удовлетворять те или иные потребности рынка), а также внешние и внутренние факторы, влияющие на изменение объема рынка $V_0(t)$ и его составных частей – сегментов. Имея данные о бюджете и производственных возможностях организации (свойствах выпускаемого продукта/услуги), модель позволяет определить наиболее подходящий сегмент исходя из текущей рыночной ситуации.

Ограничения модели сводятся к следующему:

1) не рассматриваются механизмы, причинно-следственные связи, а также детализация внешних и внутренних факторов воздействия на рынок,

их воздействие не разделяется и рассматривается в качестве суммарного эффекта, который подчиняется методам статистического анализа, а также подлежит прогнозированию в среднесрочной перспективе;

2) исключаются какие-либо другие источники, влияющие на поведение рынка как такового;

3) оценка технических возможностей (свойств продукта/услуги), а также планирование бюджета и оценка эффективности его использования возлагается на экспертное мнение исследователя.

Сегментирование рынка можно рассматривать с нескольких позиций:

– формальной, связанной с конкретной задачей выхода компании на целевой рынок;

– глобальной, связанной с рассмотрением рынка в качестве многомерного объекта.

Если в первом случае сегментирование рынка рассматривается в качестве промежуточного звена цепочки «сегментирование-таргетирование-комплекс маркетинга» [10] и используется в качестве оперативного инструмента прикладного маркетинга, то второй подход связан с более глубокой работой над структурой рынка. Здесь имеется в виду, что рынок воспринимается исследователем в качестве разнородного объекта, структура которого может быть представлена как в качестве плоской проекции некоторых параметров сегментирования, так и в качестве единого объекта некоторой геометрии.

В работе [9] был предложен вариант использования тензорного формализма в качестве математического аппарата, позволяющего свободно измерять и преобразовывать сегменты рынка в соответствии с выбранными переменными, сохраняя при этом единую структуру исследуемого объекта (рынка). Однако данный подход не является единственным при работе с многомерными данными. Так, в работе [4] указаны ещё несколько вариантов – это классический (скалярный), подход функционального анализа, векторно-матричный и многомерно-матричный.

Каждый из перечисленных подходов имеет свои преимущества и недостатки относительно предполагаемой области применения. К примеру, использование скалярного подхода для рассматриваемой модели не подходит из-за громоздкости представления данных, а также отсутствия теоретической и алгоритмической общности. Применение же функционального анализа не позволит выйти за рамки теоретической модели, поскольку данный подход не рассчитан для практических исследований (данные представляются в качестве абстрактных математических пространств). Векторно-матричный подход также не приемлем для исследуемой модели, поскольку он ограничен квадратичной формой и не позволяет рассматривать модели более высоких порядков [5, 6].

Фактически из всех возможных подходов к формализации данных модели подходит лишь тензорный и многомерно-матричный. Рассмотрим эти

два подхода подробнее и выявим различия.

Многомерно-матричный подход использует в качестве переменной многомерную матрицу. В данном случае имеется ввиду, что многомерной (p-мерной) ($n_1\times n_2\times\dots n_p$)-матрицей

$$A=(a_{i_1,i_2,\dots i_p}),i_\alpha=\overline{1,n_\alpha},\alpha=\overline{1,p} \quad (1)$$

называется система чисел и переменных $a_{i1,i2,\dots,ip}$, расположенных в точках p-мерного пространства, определяемого координатами $i_1,i_2,\dots,i_p$ [3]. Если числа $n_1\times n_2\times\dots n_p$ различны, что матрица А называется гиперпрямоугольной, если они равны – гиперквадратной или *p*-мерной матрицей *n*-го порядка. Представленное определение многомерной матрицы обобщает понятия скалярной величины, вектора и двумерной величины – это соответственно нуль-, одно- и двумерные многомерные матрицы [4].

Тензором *A* ранга $p=r+s$ типа (r,s) (*r* раз ковариантным и *s* раз контравариантным) называется геометрический объект, который в каждом базисе e_i, $i=\overline{1,n}$ вещественного *n*-мерного линейного пространства L^n определяется n^{r+s} координатами $a^{k_1,\dots k_s}_{i_1,\dots i_r}$ (индексы $i_1,\dots,i_r$; $k_1,\dots,k_s$ независимо принимают значения 1,2,…,*n*), обладает тем свойством, что его координаты $a^{k_1',\dots k_s'}_{i_1',\dots i_r'}$ в базисе $e_{i'}$, $i'=\overline{1,n}$ связаны с координатами $a^{k_1,\dots k_s}_{i_1,\dots i_r}$ в базисе e_i соотношением

$$a^{k_1',\dots k_s'}_{i_1',\dots i_r'}=b^{i_1}_{i_1'}\dots b^{i_r}_{i_r'}\cdot b^{k_1'}_{k_1}\dots b^{k_s'}_{k_s}\cdot a^{k_1,\dots k_s}_{i_1,\dots i_r}, \quad (2)$$

в которых $b^i_{i'}$ – элементы матрицы переходы от базиса e_i к базису $e_{i'}$, а $b^{k'}_k$ – элементы обратного перехода от $e_{i'}$ к e_i.

Формула (2) – формула преобразования координат тензора при преобразовании базиса [4].

У представленных выше подходов есть одна общая особенность – многомерная матрица и тензор представляют собой совокупность многоиндексных величин. В свою очередь, тензор не является многомерной матрицей, так как не рассматривается в пространстве своих индексов. Удобство использования и область применения математического инструмента определяется на усмотрение исследователя с тем примечанием, что тензорный подход предполагает отбрасывание свойств непосредственно тензора и использование лишь его обозначения для записи многомерных матриц.

Касательно практической работы с многомерными объектами в программных пакетах, то наиболее популярными среди известных являются: MAPLE, MATHCAD, MATLAB и Mathematica. К примеру, дополнительный модуль «tensor» для MAPLE позволяет создавать тензорные объекты, преобразовывать их и совершать значительное количество основных и вторичных операций над ними. MATLAB и Mathematica также достаточно

удобны для работы с векторами, многомерными матрицами и тензорами. В пакете MATHCAD для работы с тензорами используются вложенные массивы, по-другому – многоиндексные массивы.

При выборе программного пакета необходимо точно понимать цели и круг задач, которые необходимо решить. К примеру, для исчисления тензорных величин в плоском и искривленном пространстве-времени, для решения задач релятивистской электродинамики, специальной и общей теории относительности, где важно сохранять свойства тензоров и их алгебру, наиболее подходящим будет MAPLE. В тех случаях, где использование тензоров ограничивается их формализмом, будет достаточно пакета MATHCAD. При работе с моделью сегментирования рынка никаких особенных операций с тензорами не требуется, поэтому разумно использовать MATHCAD.

Для описания геометрии рынка в разрезах сегментов введем параметр *S*. В данном случае *S* – является математическим отражением геометрии рынка и задается с помощью использования многоиндексного массива.

Пусть рассматриваемый рынок характеризуется четырьмя переменными сегментирования, в качестве количественной характеристики, отражающих геометрию рынка, будем использовать объем отдельных сегментов в натуральном выражении. Очевидно, что первое условие, которое налагается на компоненты *S* – сумма объемов отдельных сегментов, выбранных по заданной переменной сегментирования, должна равняться объему рынка. То есть если рассматривать структуру рынка согласно заданным переменным сегментирования (таблица 1), а переменные сегментирования отнести к соответствующим структурам S_1, S_2, S_3, S_4, то при выполнении (3) должно выполняться (4):

$$\begin{cases} V_{S1} = V_{A1} + V_{B1} \\ V_{S2} = V_{A2} + V_{B2} + V_{C2} + V_{D2} \\ V_{S3} = V_{A3} + V_{B3} \\ V_{S4} = V_{A4} + V_{B4} + V_{C4} \end{cases}, \tag{3}$$

$$V = V_{S1} = V_{S2} = V_{S3} = V_{S4}, \tag{4}$$

где V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}, V_{s4} – объемы рынка, соответствующие структурам S_1, S_2, S_3, S_4; V_A, V_B, V_C, V_D – объемы сегментов рынка, соответствующие структурам S_1, S_2, S_3, S_4; V – объем исходного рассматриваемого рынка.

Задать многоиндексный массив означает записать параметр *S* в качестве матрицы, состоящей из структур $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{1,2}$, $S_{2,2}$, где $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{1,2}$, $S_{2,2}$ являются, в свою очередь, вектор-столбцами, содержащими информацию о структуре рынка в разрезе соответствующих сегментов. В частном случае (данные таблицы 1), $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{1,2}$, $S_{2,2}$ будут выглядеть так, как представлено на рис. 2.

В данном случае для $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{1,2}$, $S_{2,2}$ выполняется условие (4), что

позволяет говорить о том, что *S* в простейшем виде отражает структуру рынка в разрезе сегментов. Записав данные таблицы в виде матрицы, будем называть ее моносегментной.

Таблица 1

Данные по объему отдельных сегментов рынка согласно выбранным переменным сегментирования

Сегмент	Переменная сегментирования 1	Переменная сегментирования 2	Переменная сегментирования 3	Переменная сегментирования 4
i=1..4	Структура S1	Структура S2	Структура S3	Структура S4
A_i	10	5	15	10
B_i	15	4	10	5
C_i	-	6	-	10
D_i	-	10	-	-
Итого	25	25	25	25

$$S_{1,1} := \begin{pmatrix} 10 \\ 15 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad S_{2,1} := \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 6 \\ 10 \end{pmatrix} \quad S_{1,2} := \begin{pmatrix} 15 \\ 10 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad S_{2,2} := \begin{pmatrix} 10 \\ 5 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} \{4,1\} & \{4,1\} \\ \{4,1\} & \{4,1\} \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Тензорный формализм и многоиндексный массив в Mathcad

Однако зачастую на практике сегментирование производится одновременно по нескольким переменным, к примеру, по возрасту и полу. В таком случае использование моносегментной матрицы некорректно. Матрицу, отражающую данные по объему пересекающихся сегментов по двум признакам, будем называть матрицей сегментирования второго порядка (таблица 2), по трем признакам – третьего порядка и т.д.

Для того, чтобы данный аппарат можно было использовать в предложенной модели рынка, предлагается в качестве информации, заносимой в ячейки матриц, использовать не только данные по натуральному объему сегментов, но и данные по конкурентной обстановке на том или ином сегменте рынка, а также данные по воспринимаемой ценности товара потребителем того или иного сегмента рынка. В данном случае, кроме S – объемной матрицы, можно ввести:

– матрицу конкурентной напряженности B,
– матрицу чувствительности к товару F.

Таблица 2

Данные по объему отдельных сегментов рынка согласно выбранным переменным сегментирования

	S1-S2	S1-S3	S1-S4	S2-S3	S2-S4	S3-S4
Признак 11-21	3	7	2	0	0	0
Признак 11-22	0	3	1	0	0	0
Признак 11-23	2	0	7	0	0	0
Признак 11-24	5	0	0	0	0	0
Признак 12-21	2	8	8	0	0	0
Признак 12-22	4	7	4	0	0	0
Признак 12-23	4	0	3	0	0	0
Признак 12-24	5	0	0	0	0	0
Признак 21-31	0	0	0	3	0	0
…	…	…	…	…	…	…
Признак 32-42	0	0	0	0	0	0
Признак 32-43	0	0	0	0	0	5

Таким образом, сопоставляя данные по бюджету маркетинга с данными матрицы B, а технические возможности организации с данными матрицы F, можно прогнозировать долю компании на рынке.

Подводя итог, следует отметить следующее:

– для работы с предложенной моделью рынка целесообразнее всего вместо тензорного использовать многомерный матричный подход;

– используя единую структуру матриц можно использовать информацию как по натуральному объему сегментов рынка, так и по конкурентной ситуации на том или ином сегменте рынка, а также воспринимаемую потребителем ценность предлагаемого товара.

Предложенный математический аппарат позволяет максимально удобно использовать данные о рынке для того, чтобы выбрать наиболее подходящие для организации сегменты, а также спрогнозировать потенциальную долю рынка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев К.К., Крашенинников В.Р. Методы фильтрации многомерных случайных полей. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1990. – 128 с.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. – 552 с.
3. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. – 939 с.

4. Муха В.С. Анализ многомерных данных: монография – Минск: Технопринт, 2004. – 366с.
5. Соколов Н.П. Введение в теорию многомерных матриц. Киев: Наукова думка, 1972. – 176 с.
6. Хорн Р., Джонсон *Ч.* Матричный анализ. М.: Мир, 1989. – 656 с.
7. Кластеризация регионов по уровню социально-экономического развития на основе самоорганизующихся карт Кохонена / Ю.В.Гордополов, Н.С. Лукашевич // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. – Сер. «Экономические науки». – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2010. – № 99. С.27-33.
8. Опыт применения многомерного метода при сегментировании рынка судовой трубопроводной арматуры / В.Н. Череватенко // Морской вестник. -2012, -№3, С. 109-112.
9. О применимости тензорного метода в сегментировании / В.А. Дубола-зов, В.Н. Череватенко // XL Неделя науки СПБГПУ: материалы международной научно-практической конференции. – СПб.: Издательство Политен. ун-та, 2011, С.400-402.
10. О критериях выбора целевых сегментов рынка / В.Н. Череватенко // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития ’2012. Материалы международной конференции SWorld, 2012.

УДК 37.022

Н. Н. Шекшаева

МЕТОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОЭТАПНОГО ФОРМИРОВАНИЯ У СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ КОМПЕТЕНТНОСТИ В ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ[1]



Наталья Николаевна Шекшаева, аспирант
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»
Россия, Саранск
Тел.: (8342)25-44-96, E-mail: nata-frolova08@mail.ru

Аннотация

Предлагается методическая система поэтапного формирования компетентности в инновационной инженерной деятельности, в результате реализации которой отмечен рост количественных и качественных показателей у студентов научной активности.

Ключевые слова: инновационная инженерная деятельность, методическая система, компетентность, этапы обучения.

N. N. Shekshaeva

METHODOLOGICAL SYSTEM OF FORMATION STEP-BY-STEP OF INNOVATIVE COMPETENCE BY TECHNICAL STUDENTS

Natalya N. Shekshaeva, e-mail: nata-frolova08@mail.ru
Ogarev Mordovia State University

Abstract

To suggest methodological system of formation step-by-step of innovative competence as a result of which get registered rise in numerical and qualitative activities by students of science activity.

Key words: innovative engineering activity, methodological system, competence, step-by-step education.

[1] Осуществлено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания, проект 53/18 – 12 «Формирование у студентов национальных исследовательских университетов компетентности в инновационной инженерной деятельности на основе погружения в инженерное творчество».

В настоящее время модернизация промышленности России, основанная на инновационном подходе, невозможна без развития и совершенствования инженерного образования, перед которым стоит задача повышения уровня подготовки специалистов, готовых к инновационной инженерной деятельности (ИИД). ИИД включает определенный типовой набор работ: анализ существующего технического уровня, синтез нового технического решения, разработка, создание новой техники и технологий, доведенных до вида товарной продукции, представленной нематериальными инновационными продуктами в виде охранных документов на результаты интеллектуальной деятельности, научно-технической и технологической документации, и материальными – в виде товара, работы, услуги, обеспечивающими экономический, социальный или другой эффект, и, следовательно, являющимися конкурентоспособными [1- 3].

Анализ Федеральных государственных образовательных стандартов показал, что для таких стратегически важных направлений обучения как: сельское хозяйство, энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника и др., в их базовой части не предусмотрен цикл дисциплин, обеспечивающих формирование компетентности в инновационной инженерной деятельности [5-8]. Хотя эти стандарты, основанные на компетентностном подходе, и разрабатывались для подготовки специалистов к инновационной деятельности. Поэтому многие студенты не обладают умением применять фундаментальные и прикладные знания для получения технических решений и управлять исключительными правами на результаты интеллектуальной деятельности (РИД).

Нами была разработана педагогическая модель (рис. 1) [4] методической системы поэтапного формирования компетентности в ИИД при обучении инновационной деятельности.

Она состоит из мотивационно-целевого, содержательного, процессуально-технологического и диагностического компонентов.

Мотивационно-целевой компонент модели включает в себя цели и задачи обучения. Целью является – формирование у студентов компетентности в инновационной инженерной деятельности при решении профессиональных задач. Для достижения поставленной цели ставятся следующие взаимосвязанные и взаимодополняющие задачи: 1) формирование у студентов мотивации к инновационной инженерной деятельности; 2) развитие творческих способностей студентов, являющихся ядром инновационной инженерной деятельности; 3) формирование научного убеждения, что каждого человека можно научить творческому мышлению; 4) формирование у студентов умения найти и правильно поставить перед собой задачу; 5) формирование у студентов способности к умозаключению, анализу и синтезу материала; 6) формирование у студентов знаний о правовой охране на результаты интеллектуальной деятельности; 7) выработка навыков проведения патентных исследований и использование их в управлении ИИД; 8)

формирование у студентов умения в получении инновационных продуктов (патентов).

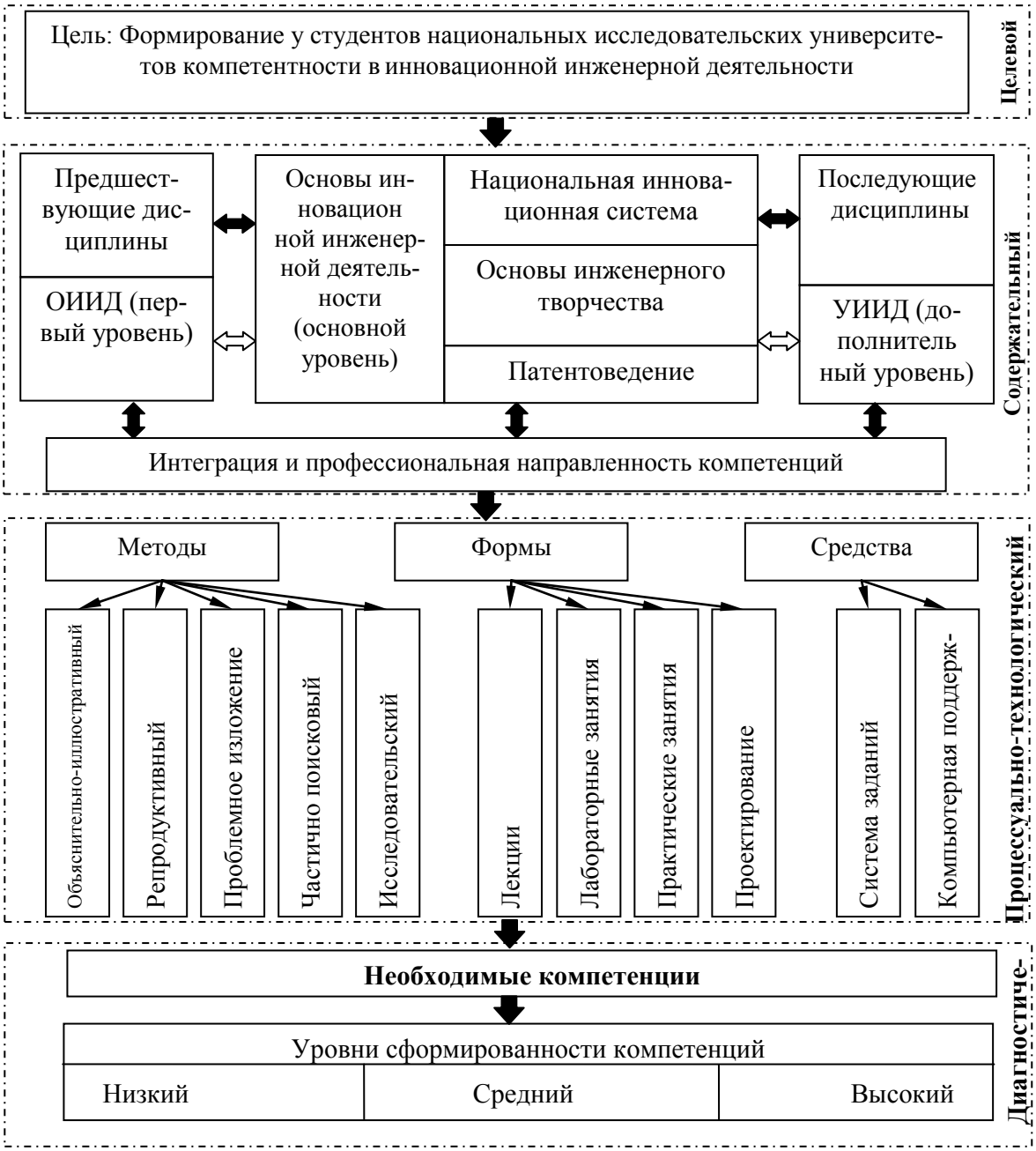


Рис. 1. Педагогическая модель формирования у студентов национальных исследовательских университетов КИИД

Содержательный компонент основывается на знаниях, усвоенных студентами при изучении как общеобразовательных, так и общетехнических дисциплин, он предусматривает первый уровень подготовки студентов на предшествующем этапе обучения в общеобразовательной школе или в летней научной школе, факультативных занятиях и др. для студентов.

Основной уровень изучается студентами во время учебного процесса

и состоит из положений в области инновационной деятельности, характеристики национальной инновационной системы, законов развития техники, системы развития творческого потенциала и решения изобретательских задач, положений законодательных и нормативных документов в области исключительного права на результаты интеллектуальной деятельности. Знания, усвоенные при изучении первого и основного уровней, имеют четкую взаимосвязь с последующими дисциплинами, они позволяют улучшить понимание изучаемых специальных дисциплин, грамотно подходить к решению научно-технических задач, развивать творческие способности, научиться вычленять охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности и грамотно управлять ими. Курс данной дисциплины получил свое развитие на дополнительном уровне под названием «Управление инновационной инженерной деятельностью» (УИИД) и читается для слушателей института дополнительного образования, в рамках которого специалисты получают необходимую информацию для решения профессиональной задачи и гарантированно приходят к требуемому результату в виде инновационного продукта [9-10].

При этом основополагающими дидактическими принципами выступают принципы активности, наглядности, системности, доступности, интеграции, преемственности, непрерывности обучения и т. п.

Процессуально-технологический компонент модели методической системы, построенный на основе компетентностного подхода в обучении, а также теории полного усвоения и педагогики сотрудничества, включает методы, формы и средства обучения.

Внедрены такие методы, способствующие развитию всех элементов творческих способностей, как: объяснительно-иллюстративный – студенты получают знания на «мультимедийных лекциях-презентациях»; репродуктивный метод осуществляется при решении контрольных задач на основе Алгоритма решения изобретательских задач (АРИЗ); в ходе проблемного изложения преподаватель, прежде чем излагать материал, формулирует проблему, а затем, раскрывая систему доказательств, показывает способ решения; эвристический или частично-поисковый – преподаватель ставит перед студентами задачу и организует активный поиск её решений студентами («мозговой штурм», обратный «мозговой штурм», синектика), при исследовательском методе студенты выполняют самостоятельную, научно-исследовательскую работу при подготовке к семинару и к заключительной работе-презентации.

В работе рассмотрены различные по дидактическим целям теоретические и практические формы организации (лекции, практические и лабораторные занятия) учебные занятия, направленные на развитие творческих способностей. Разработаны педагогические технологии обучения такие как: активное обучение, обучение в команде, информационные технологии, а также технологии дистанционного образования.

В качестве дидактических средств нами разработан учебно-методический комплекс, одноименные с дисциплиной учебное пособие и учебник с грифом УМО, система заданий к практическим, лабораторным занятиям и для самостоятельной работы. Внедрены и современные технические средства обучения: электронный учебник, компьютерная поддержка (база данных сети интернет) при выполнении лабораторных работ, интерактивная доска, мультимедийные средства и др.

Диагностический компонент модели предполагает диагностику уровня сформированности (низкий, средний, высокий) у будущих инженеров компетентности в инновационной инженерной деятельности как совокупности общекультурных и общепрофессиональных компетенций. Он реализуется через систему заданий: уровень сформированности знаний мы оцениваем с помощью тестирующих и контролирующих материалов, умения – при выполнении индивидуальных или групповых проектов, а также при выполнении ВКР; а личностные качества при помощи психологических тестов.

Для реализации данной педагогической модели на основе анализа алгоритма получения ИП в результате ИД была спроектирована интегрированная дисциплина «Основы инновационной инженерной деятельности» (ОИИД). Дисциплина образовалась в результате эволюции. В 1995 г. после утверждения Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ГОС ВПО) первого поколения, позволявшего вводить дисциплины по выбору, в Мордовском государственном университете начала читаться дисциплина «Основы инженерного творчества» (ОИТ). Её целью было помочь творчески мыслящим студентам развить свои природные способности и повысить качество решаемых профессиональных задач, а остальным студентам – сократить время на решение поставленных задач. В 2000 г. был утвержден ГОС ВПО второго поколения, страна встала на путь перехода к инновационной экономике. Встала задача не только уметь решать профессиональные задачи, но и получать конкретный результат. С этой целью на основе вышеназванной дисциплины была предложена дисциплина «Основы инженерного творчества и патентоведения» (ОИТиП). Изучение патентных исследований стало необходимой составной частью подготовки высококвалифицированного инженера, так как позволяет понять возможности использования патентной информации (ее правовых и технических аспектов) для создания конкурентоспособной продукции, свободного выхода этой продукции на рынок. Снижения уровня юридических и экономических рисков, связанных с охраной и защитой объектов интеллектуальной собственности.

В 2009 г. был утвержден ФГОС ВПО третьего поколения. Удовлетворяя его требованиям в 2010 г. на основе двух вышеназванных дисциплин была разработана интегрированная дисциплина «Основы инновационной инженерной деятельности» (ОИИД) [1], включающая следующие разделы:

национальная инновационная система и её инфраструктура, методы решения нестандартных профессиональных задач, основы патентоведения и основы патентных исследований. Первый из них включает основные понятия инноватики, характеристику ИД, классификации ИП, формулировку требований к специалисту, готовому к ИИД и предназначен для формирования мотивации к ИД. Второй объединяет законы развития технических систем, методы решения изобретательских задач, включая эвристические методы и методы-комплексы – инструмента к принятию решений, и является основой обучения техническому творчеству и формирования компетентности в ИИД. Третий раздел рассматривает область исключительных прав на РИД и заключается в описании, объяснении и предсказании инновационных процессов. Это важная категория ИД, обладающая товарной, технологической, правовой, экономической, символической и культурообразующей функциями. Знания о мировой системе правовой охраны РИД, об изменениях в ней и ее возможностях становятся необходимыми. Четвертый раздел направлен на развитие навыков проведения патентных исследований – исследований технического уровня и тенденций развития объектов хозяйственной деятельности, их патентоспособности, патентной чистоты, конкурентоспособности на основе патентной и другой информации. Патентные исследования являются необходимой составной частью ИИД, так как позволяют понять возможности использования патентной информации для создания конкурентоспособной продукции, свободного выхода этой продукции на рынок, снижения уровня юридических и экономических рисков, связанных с охраной и защитой объектов интеллектуальной собственности. Все эти разделы являются действенными и значимыми инструментами эффективного управления процессом создания, освоения, производства и сбыта ИП, повышения ее конкурентоспособности, т.е. процесссом ИИД.

Таким образом, в рамках одной дисциплины ОИИД удалось представить полный цикл ИИД: анализ проблемы – постановка задачи – получение технического решения – подтверждение его конкурентоспособности – обретение исключительных прав на РИД (патент –ИП высшего качества), при этом формируются все компоненты компетентности в ИИД, определяющие подготовку студентов к ИД.

Конкретная методическая система, разработанная на основе теоретической модели, была реализована при обучении студентов в летней школе и слушателей института дополнительного образования интегрированной общетехнической дисциплине ОИИД [11-14]. Методика обучения школьников и слушателей института дополнительного образования отличается от методики обучения студентов национальных исследовательских университетов уровнем и объемом предлагаемой информации. Так методика обучения для школьников направлена, прежде всего, на формирование многоэкранного мышления, развитие творческих способностей. Слушате-

лям института дополнительного образования предлагаются более конкретные, практико-ориентированные задачи, реально сформированные самими слушателями. Для них методика обучения предусматривает экскурсии на малые инновационные предприятия (МИП), студенческие конструкторские бюро (СКБ) при вузе.

По программе дополнительной подготовки «Управление ИИД» прошли подготовку 2012 г. 20 преподавателей МГУ и 45 молодых ученых из других вузов, а по программе «Организация ИИД в условиях высокотехнологичного производства» - 15 инженерно-управленческих кадров с высокотехнологичных предприятий РМ, входящих в кластер «Светотехника».

Эффективность обучения дисциплине ОИИД подтверждена экспериментом, который проходил во время проведения лекционных, практических и лабораторных занятий, в результате отмечен рост количественных и качественных показателей у студентов научной активности:

1) с их участием осуществляются международные, всероссийские, региональные публикации;

2) получено 6 патентов на полезные модели;

3) только в 2012 году два студента стали лауреатами премии Президента Российской Федерации;

4) выигран грант в конкурсном отборе одно- и двухлетних проектов по разработке и реализации программ развития студенческих конструкторских бюро и аналогичных общественных объединений студентов в рамках мероприятия 2.4 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2008 г. № 568 на сумму 2 млн. руб;

5) создается на основе кафедрального студенческого конструкторского бюро сектор быстрого прототипирования;

6) победа студентов нашего института во Всероссийских студенческих олимпиадах по направлениям «Теория механизмов и машин», «Механизация сельского хозяйства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н. И. Наумкин, Е. П. Грошева, Н. Н. Шекшаева. Основы инновационной инженерной деятельности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2012. - № 9.– С. 85–86.
2. Н. И. Наумкин, Е. П. Грошева. Педагогическая модель подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности при обучении техническому творчеству // Интеграция образования. – 2010. – №2 (59). – С. 26 – 30.
3. Н. И. Наумкин, Н. Н. Шекшаева. Формирование компонентов компетентности в инновационной деятельности при курсовом проектировании на

основе дифференцированного подхода // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского –№ 2(40)/2012. – С. 140–144.
4. Н. И. Наумкин, Н. Н. Шекшаева. Поэтапное формирование компетентности в инновационной инженерной деятельности у студентов национальных исследовательских университетов // Материалы XII Международной научно-методической конференции «Физическое образование: проблемы и перспективы развития», посвященной 90-летию со дня рождения С. Е. Каменского. Часть 2. –М.: МПГУ, 2013. С. 158-161.
5. Н. И. Наумкин. Оценка эффективности формирования у студентов технических вузов способности к инновационной инженерной деятельности в процессе обучения общетехническим дисциплинам // Сибирский педагогический журнал. – 2008. – № 8. – С. 30 – 38.
6. Н. И. Наумкин. Интегрированная технология обучения общетехническим дисциплинам, обеспечивающая формирование у студентов способности к инновационной инженерной деятельности // Вестник Волгоградского педагогического университета. – 2008. – № 6 (30). – С. 66 – 69.
7. Н. И. Наумкин. Формирование у студентов технических вузов способности к инновационной инженерной деятельности // Высшее образование сегодня. – 2008. – № 9. – С. 79 – 81.
8. Н. И. Наумкин, Е. П. Грошева. Междисциплинарная интеграция инженерного образования в процессе формирования у студентов технических вузов способности к инновационной инженерной деятельности // Наука и образование. – 2008. – № 6 (54). – С. 46 – 54.
9. Н. И. Наумкин, Г. И. Шабанов, Е. П. Грошева. Формирование способности к инновационной инженерной деятельности у студентов технических вузов // Интеграция образования. – 2008. – № 3 (52). – С. 3 – 8.
10 Н. И.. Наумкин. Методическая система формирования у студентов технических вузов способности к инновационной инженерной деятельности // Наука и школа. – 2008. – № 6. – С. 4 – 8.
11. Н. И. Наумкин. Формирование у студентов технических вузов способностей к инновационной инженерной деятельности при обучении общетехническим дисциплинам // Педагогическое образование и наука. – 2008. – № 6. – С. 52 – 56.
12. Н. И. Наумкин. Развитие способностей к инновационной инженерной деятельности у студентов технических вузов // Вестник Кыргызско-Российского университета. – 2008. – Том. 8, №12. – С. 45-49.
13. Н. И. Наумкин, Е.П. Грошева, Н.Н. Фролова Подготовка студентов национальных исследовательских университетов к инновационной деятельности на основе компетентностного подхода // Интеграция образования. – 2010. – №4 (61). – С. 28 – 33.
14. Н. И. Наумкин и [др.] Особенности подготовки студентов к инновационной деятельности // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. - №10. – С. 53 -55.

УДК 330.133.7

В. В. Щеголев

ПОТРЕБИТЕЛЬСКАЯ ЦЕННОСТЬ ТОВАРА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ РЫНКАХ



Щеголев Владимир Владимирович, доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)535-8108, E-mail: shchegolev@kafedrapik.ru.

Аннотация

В статье приводится анализ существующих определений потребительской ценности, описание источников потребительской ценности товара на промышленных рынках, перечень существующих методов оценки потребительской ценности, даются рекомендации о применении величины потребительской ценности в ценообразовании и о фокусировании ограниченных ресурсов российских производителей на наиболее значимых элементах потребительской ценности.

Ключевые слова: промышленные рынки, потребительская ценность, методы оценки потребительской ценности, ценообразование на основе ценности

V.V.Shchegolev

CUSTOMER VALUE IN INDUSTRIAL MARKETS

Vladimir V. Shchegolev, St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
e-mail: shchegolev@kafedrapik.ru

Abstract

The paper is an analysis of the existing definitions of customer value, description of the sources of customer value in industrial markets, a review of existing methods for assessing customer value, it provides guidance on the application of value in pricing and focusing the limited resources of Russian enterprises on the most important elements of customer value.

Key words: industrial markets, customer value, methods of customer value assessment, value-based pricing

Современная концепция промышленного маркетинга определяет связи с потребителями и увеличение ценности товарного предложения как основную задачу, способствующую повышению финансово-экономических показателей предприятия. Проблемы потребительской ценности крайне мало исследованы в отечественной литературе и слабо адаптированы к применению в деятельности российских промышленных предприятий.

Для конкурентных рынков продукции производственно-технического назначения типична ситуация, когда переменные затраты высоки по сравнению с постоянными затратами, поэтому вероятность "ценовых войн" уменьшается и цена перестает быть основным инструментом конкуренции. Это связано с тем, что сокращение цены требует резкого повышения объема продаж для сохранения прежнего объема прибыли. Например, десятипроцентное снижение цены при доле переменных удельных затрат, равной 60 процентов, потребует прироста объема продаж на 33 процента. В то же самое время двадцатипроцентное снижение цены потребует уже стопроцентного прироста объема продаж для сохранения прежнего объема прибыли. Это сравнение показывает, насколько чутко прибыль реагирует на уменьшение цены при высоких переменных затратах. Можно сделать вывод, что если переменные затраты высоки, то для компенсации негативных последствий резкого снижения цены требуется значительно большее наращивание объема продаж. При этом незначительное увеличение цены способно привести к большему объему прибыли и способно повысить рентабельность продаж. Все эти данные показывают, что усилия в случае промышленных рынков предпочтительнее направить на защиту уровня цен, а не на увеличение объема продаж.

Уровень цен определяет экономические показатели организации. Согласно данным, основанным на исследовании 500 ведущих мировых компаний, входящих в список Fortune, пятипроцентное увеличение цены, в среднем, способствует росту прибыли на 22 процента. Это высокий показатель по сравнению с реакцией цены на изменение других показателей: пятипроцентный рост продаж способствует, в среднем, росту прибыли на 12 процентов; пятипроцентное сокращение себестоимости способствует, в среднем, росту прибыли на 10 процентов. Изменение подхода к ценообразованию промышленных предприятий с затратного на ценностный позволяет устранить проблему установления слишком низких и согласно результатов большинства зарубежных исследований, ведет к росту показателей прибыли.

Объектом для нашего исследования являются предприятия, производящие продукцию производственно-технического назначения (далее, промышленная продукция), как готовые изделия, так и полуфабрикаты (исключая природное сырье). Исследование потребительской ценности промышленной продукции, выгод, которые получит потребитель, и соотноше-

ние этих выгод с ценой, ведет к оптимизации ценообразования и повышению финансово-экономических показателей деятельности.

Таким образом, процесс оценки потребительской ценности формализуется нами в целях ценностного ценообразования и последующей демонстрации приростной ценности покупателям на промышленных рынках.

В данной статье поставлены следующие задачи:

1. Определить сущность и перечислить составные части потребительской ценности промышленной продукции.

2. Привести наиболее полный перечень методов оценки потребительской ценности промышленной продукции, описать проблемы их применения в РФ и наметить пути решения этих проблем.

1. Анализ определений потребительской ценности промышленной продукции

Ученые в области маркетинга (В. Улага и С.Чакур) [8] осознают, что эта область все еще слабо изучена и определение потребительской ценности товарного предложения на промышленных рынках не согласовано среди ее исследователей.

Определения потребительской ценности были предложены разными авторами. Джон Форбис и Нитин Мехта выделили аспект конкуренции в рассмотрении термина “ценность”. Они предложили концепцию “экономической ценности для потребителя” [4], которая рассматривает максимальную сумму денег, которая фирма-покупатель будет готова уплатить, с одновременной комплексной оценкой основного товарного предложения и других, доступных предложений конкурентов.

Винцент Рейтер вводит понятие “ценности использования”, который описывает ценность, связанную с функционированием продукции в определенном потребительском применении. По словам Рейтера “Особенно для продукции промышленного назначения, анализ ценности в основном связан с ценностью использования – производительностью и надежностью продукции” [7]. Томас Нейгл и Рид Хольден говорят: “В обычном использовании термин «ценность» означает общую экономию или удовлетворение, которое клиент получает от продукта. Экономическая ценность продукта – это цена наилучшей для потребителя альтернативы (эталонная цена) плюс ценность любых отличий товарного предложения от альтернативного (ценность отличий)” [6].

Большинство исследователей определяют потребительскую ценность как выгоды, полученные потребителем, в сравнении с затратами, необходимыми для получения этих выгод. При этом исследователи расходятся во мнении как относиться к затратам по приобретению (включающим закупочную цену) в составе потребительской ценности. Часть исследователей включают их в состав потребительской ценности (В. Улага и С.Чакур), другая часть исследователей исключает их из состава ценности (Д. Андерсон, Н. Кумар и Д. Нэрус [2]).

Есть два разных подхода к определению потребительской ценности. Часть исследователей (В. Улага и С. Чакур) придерживаются мнения, что потребительская ценность формируется как разность между потребительской готовностью платить определенную сумму и реальной ценой приобретения. Мартин Христофер отмечает, что готовность платить связано с набором воспринимаемых выгод, которые обеспечивает фирме-покупателю товар. Он относит этот аспект к понятию потребительского излишка, который является "денежной суммой, представляющая собой разницу между денежным эквивалентом набора воспринимаемых выгод и ценой" [3]. Другая часть исследователей (Т. Нэйгл, Р. Холден, Д. Андерсон, Н. Кумар и Д. Нэрус) определяют ценность как сумму комбинированных выгод для потребителя в результате приобретения товарного предложения. Рассматривая ценность как совокупность выгод, перечислим основные выводы, которые можно сделать касательно определений концепции потребительской ценности для промышленной продукции:

1. В большинстве определений говорится о воспринимаемой потребителями ценности.

2. Ценность выражается в деньгах, что является обязательным условием для ее применения в целях ценообразования.

3. Ценность должна учитывать набор выгод, который фирма-покупатель получает в процессе использования товарного предложения.

4. Ценность рассматривается относительно конкурентной альтернативы.

5. Ценность ориентирована на будущее и ее можно представить как ряд ожидаемых выгод.

2. Определение потребительской ценности промышленной продукции

Источники потребительской ценности товара на промышленных рынках можно разделить на следующие категории:

1. Экономические выгоды. Основным источником ценности товарного предложения служат экономические выгоды в виде экономии затрат, которые потребитель получает при пользовании данной промышленной продукции по сравнению с альтернативной на протяжении жизненного цикла использования продукции. Данный аспект ценности у некоторых авторов определяется формально как экономическая ценность для потребителя. Экономические выгоды можно разделить на три категории:

1.1. Экономия прямых затрат (за исключением цены приобретения): сокращение затрат на потребление электроэнергии и других видов энергии, сокращение затрат на обработку продукции и пр.

1.2. Экономия затрат на приобретение (за исключением цены приобретения), связанных, например, с логистикой поставки: скоростью и надежностью поставки, сохранностью груза, возможностью поставки малыми партиями, ускорением таможенных процедур и пр.

1.3. Экономия операционных затрат (за исключением цены приобретения), например, затрат на ввод в эксплуатацию, обслуживание и ремонт, на обучение, на утилизацию и пр.

2. Функциональные выгоды. Функциональная ценность определяется теми свойствами товарного предложения, которые обеспечивают потребителю утилитарные преимущества. Выгоды обеспечиваются эксплуатационными характеристиками продукции, зачастую увеличивая объем выручки.

Сюда можно отнести повышенный срок эксплуатации в связи с модернизированной комплектующей деталью, повышенную производительность при использовании нового вида сырья, повышенную безопасность при применении излучения нового вида, повышенную точность, обеспечиваемую новой технологией и т.д.

3. Сервисные выгоды. Сервисные выгоды связаны с фактором простоты взаимодействия с фирмой-поставщиком. Сервисные выгоды можно разделить на три вида:

3.1. Сервисные выгоды в процессе предпродажного обслуживания: предоставление потребителю как можно более полной информации о товаре, возможность приспособления качества к индивидуальным потребностям фирмы-покупателя и др.

3.2. Сервисные выгоды в процессе покупки: доступность принятия заказа и его простоту (например, посредством Интернет), обеспечение клиента консолидированными счетами-фактурами за месяц вместо выставления отдельных счетов на каждую покупку и др.

3.3. Сервисные выгоды в процессе послепродажного обслуживания: быстрое реагирование на специфические запросы фирмы-покупателя, предложение по покупке частично отслужившей промышленной продукции, доступные запасные части, автоматическое напоминание о необходимости планового осмотра, оперативное устранение неисправностей, онлайн технической поддержки и пр.

4. Социальные выгоды, связанные с социальной ответственностью: экологическая безопасность, несложный и безопасный процесс утилизации отходов. Примером выгод, связанных с социальной ответственностью, является новое оборудование по переработке твердых бытовых отходов, которое способствует полному сокращению выбросов в атмосферу диоксидов. Это позволяет устанавливать завод в городской черте и тем самым экономить расходы по транспортировке отходов.

5. Выгоды от взаимоотношений - выгоды, связанные с возможным будущим развитием компании: будущие перспективы и возможности разработки новой продукции, возможности предлагать дополнительные решения к существующим товарам. Выгодой, связанной с возможным развитием компании также является возможность войти в сети взаимоотношений поставщика в целях развития своего бизнеса.

6. Имиджевые выгоды от бренда, которые можно разделить на два вида:

6.1. Выгоды по укреплению имиджа компании. Если взаимоотношение между продавцом и покупателем позволяет последнему заработать определенный социальный статус и престиж, например, путем рекламы своего статуса ключевого клиента фирмы-продавца другим компаниям, значит, эта связь создает ценность для промышленного предприятия. Покупатель промышленной продукции может также воспринимать ценность в случае приобретения от лидера отрасли.

6.2. Выгоды по поддержке принятия решения о закупке, например, снижение риска принятия решения о покупке при наличии крупного закупочного центра. Из многих исследований, например, исследования Р. Джексона, Л. Ниделла и Д. Лансфорда [5], становится ясно, что промышленные предприятия ощущают риск оценки закупки. В этих условиях ценность создается путем снижения степени неопределенности за счет предоставления бренда с репутацией надежного поставщика.

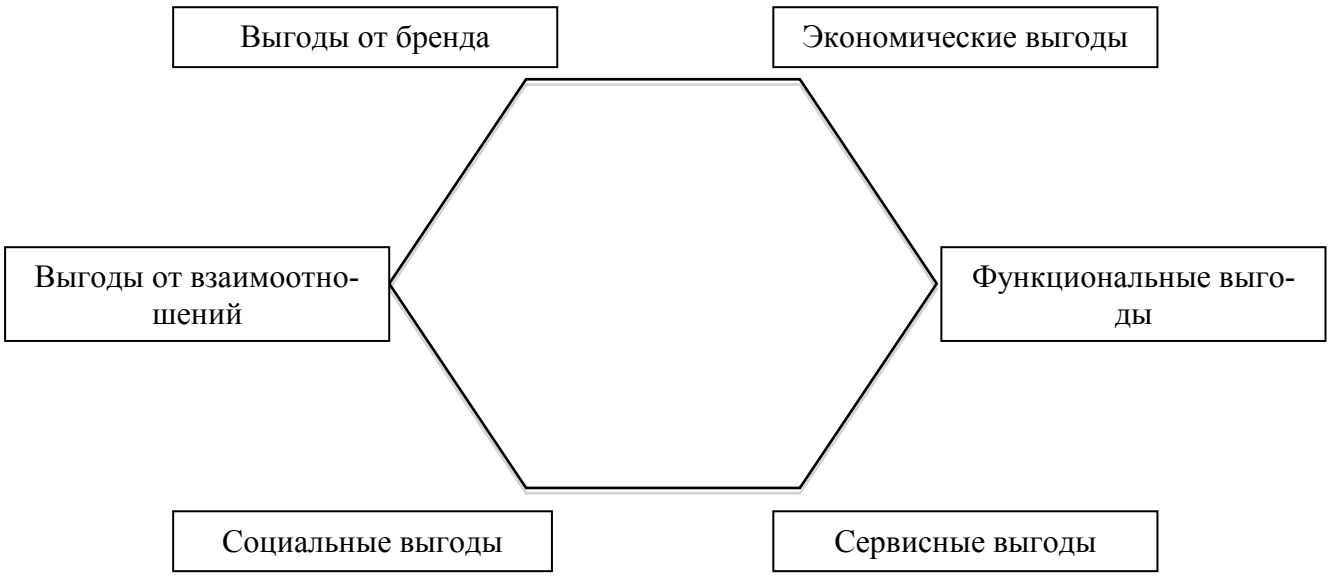


Рис. 1. Потребительская ценность на промышленных рынках - шесть направлений потребительских выгод

Автор статьи поддерживает текущую позицию нескольких авторов (Т. Нэйгл, Р. Холден, А.Хинтерхубер, Д. Андерсон, Н. Кумар и Д. Нэрус), немного корректируя их определения потребительской ценности: «Потребительская ценность товара на промышленных рынках представляет собой набор ожидаемых фирмой-потребителем экономических, функциональных, сервисных, социальных, взаимоотношенческих и имиджевых выгод в денежном выражении, которые она получает в обмен на ту цену, которую платит за данное товарное предложение, с учетом изучения всех альтернативных предложений и цен». Это определение выражает ценность пред-

ложения в денежном эквиваленте. Выгоды учитывают затраты, которые несет покупатель, желая получить эти преимущества, сверх покупной цены.

Увеличение или снижение цены не меняет набор выгод, которые данное предложение предоставляет покупателям, меняется только желание покупателей приобрести предложенное. Если бы цена рассматривалась как часть потребительской ценности, мы могли бы значительно увеличить ценность предложения, просто значительно урезав цену. Потребительская ценность – это сравнительное понятие, в котором важнейшее значение имеет понимание того, как составляющие ценности выглядят в сравнении с ближайшей наилучшей альтернативой (то есть, какова приростная ценность).

Таким образом, нами дано определение потребительской ценности товара для условий, возможных только на промышленных рынках: во-первых, покупатели принимают решения рационально, на основе тщательного изучения ценности; во-вторых, для покупателя промышленной продукции крайне важны затраты и выгоды на протяжении жизненного цикла использования промышленной продукции. К другим предпосылкам исследования потребительской ценности на промышленных рынках и ее использования в целях ценностного ценообразования можно отнести следующие:

1. Структура затрат с превалирующими переменными затратами должна вести промышленные предприятия к решению дифференцироваться не по цене, а по элементам ценности.

2. Важным достоинством ценообразования на основе потребительской ценности является его использование для одновременного формулирования конкурентной стратегии и стратегии позиционирования, позволяя фирме ясно и вовремя определить приоритеты в своем будущем дифференцировании. Даже в современных условиях не каждый менеджер на этапе инвестирования в средства производства промышленного предприятия примет решение заранее запланировать выгодный покупателю уровень цены. Это связано с тем, что в рамках ценового решения последнему предстоит определить конкурентное преимущество и обязывает его заранее организовать процесс исследования приростной ценности для потребителя.

3. Методы оценки потребительской ценности промышленной продукции

В современных условиях методы оценки потребительской ценности изучены мало и это ограничивает их практическое применение на промышленных рынках в целях ценообразования и позиционирования. Тем более, сложно сделать выводы о том, в каких обстоятельствах уместнее применять тот или иной метод, поскольку объем статистических данных об успешности фирм, применивших на практике то или иное ценностное ценообразование, очень ограничен.

В условиях, когда между разными авторами нет согласованности в определении потребительской ценности, для установления цен на промышленную продукцию в мировой практике используются самые разнообразные методы оценки потребительской ценности (табл. 1).

Таблица 1

Методы оценки потребительской ценности товара на промышленных рынках

1. Всесторонняя оценка потребительской ценности
1.1. Оценка ценности в использовании
1.2. Оценка воспринимаемой ценности фокусной группой
2. Обследование покупателей
2.1. Исследование с прямыми вопросами (ценовые пороги)
2.2. Методы декомпозиции
2.2.1. Сравнительные оценки (бенчмаркинг)
2.2.2. Совместный анализ
2.3. Композиционный подход
2.4. Ценовые эксперименты
3. Экспертная оценка и промышленные технические методы
3.1. Внутренняя техническая оценка
3.2. Исследование с косвенными вопросами
3.3. Параметрический метод
3.4. Оценка экономических преимуществ

Есть четыре группы проблем, которые связаны с этими методами.

Первая проблема связана с тем, что многие предприятия в РФ ориентируются на закупочную цену как самый главный критерий покупательского выбора. Для противодействия уступкам в цене фирма-продавец промышленной продукции должна коренным образом пересмотреть философию ведения бизнеса и принять стратегию управления потребительской ценностью. Эта стратегия предполагает разработку отчетов, отражающих экономию затрат и добавленную стоимость, которую создают для покупателей поставщики. Поставщик должен совместно с фирмой-покупателем определить критерии, по которым они будут отслеживать экономический эффект. После оговоренного периода времени совместно с менеджерами клиента оценивается и документируется достигнутый результат.

Концепция совокупной стоимости владения на практике вызывает сопротивление не только со стороны клиентов, но и со стороны маркетологов. В условиях ограничения ресурсов структурированный трудоемкий процесс сбора данных для оценки совокупной ценности в использовании зачастую ограничивается заполнением бланков, приблизительными расчетами и обменом мнениями с клиентом. Процесс же управления потреби-

тельской ценностью фокусирует ограниченные ресурсы поставщика и его клиента на наиболее значимых элементах ценности и сборе данных, необходимых для оценки каждого из них.

Вторая проблема связана с подбором подхода и методов оценки приростной ценности по значимым элементам. Резонирующий фокус в дифференцировании, согласно Д. Андерсон, Н. Кумар и Д. Нэрус (2007), концентрирует внимание потребителей на ограниченном числе выгод. Выражение в денежных единицах ценности выгод по сравнению с лучшей альтернативой является задачей, требующей ресурсов, упорства и креативности. Основная проблема этого процесса – неуверенность менеджеров в вопросе перевода разницы в выгодах в денежное выражение. Автором статьи рекомендуются определенные методы оценки выгод для разновидностей источников потребительской ценности. В зависимости от того, к какому типу источника относится резонирующий фокус, отечественные маркетологи могут ориентироваться на результаты рекомендуемого метода оценки. Предпочтительно проводить исследование одновременно по нескольким методам и далее сравнивать результаты.

Таблица 2

Рекомендуемые методы оценки ценности в зависимости от резонирующего фокуса

Тип источника ценности	Рекомендуемые методы оценки
1. Экономические выгоды	Оценка ценности в использовании на основе кооперации с клиентом (с включенным исследованием идеальной точки)
2. Функциональные выгоды	Бенчмаркинг (с включенным исследованием по методу Кано)
3. Сервисные выгоды	
4. Социальные выгоды	Совместный анализ (с включенным исследованием потребительской ценности бренда)
5. Выгоды от взаимоотношений	
6. Имиджевые выгоды	

Третья проблема связана с тем, что эти методы имеют трудности с оценкой нематериальных атрибутов потребительской ценности, такими как репутация бренда. Актуальность бренда высока при принятии решений о покупке, предполагающих участие крупного покупательского центра, которые, как правило, участвуют в принятии решений о закупке продукции с длительным сроком службы, быстро меняющихся технологий и пр. Совместный анализ может использоваться применительно к промышленной продукции и решить эту проблему. С помощью него получают количественное выражение трудно поддающиеся измерению нематериальные выгоды.

Четвертая проблема связана с тем, что на промышленных рынках в процесс оценки и выбора продукции вовлечено большое количество лю-

дей. В этой связи методы, предполагающие тесную кооперацию и взаимодействие с фирмой-покупателем, являются наиболее предпочтительным вариантом с точки зрения необходимости распознания реального процесса потребительского решения.

Знание подходов к оценке потребительской ценности позволит поставщикам быстрее адаптироваться к ценностному ценообразованию. Если приростная ценность, которую имеет данное товарное предложение с точки зрения покупателей, известна, становится возможным принимать ключевые решения в позиционировании и установлении продажной цены. Максимальная цена, которую можно установить на промышленном рынке, как правило, равна потребительской ценности; минимальная цена – переменным затратам.

Изобразим непрерывный отрезок ценности в рублях за единицу продукта. Для простоты предположим, что затраты по сравниваемым товарным предложениям (Затраты^{ф,а}) аналогичны.

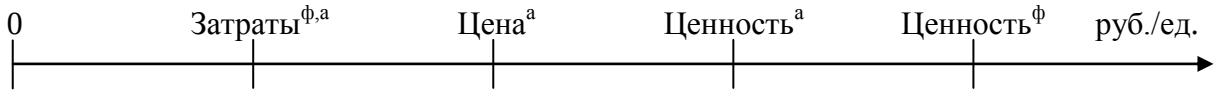


Рис. 2. Определение ценовой стратегии на основе потребительской ценности

Разница между ценностью альтернативного предложения (Ценность^{а}) и ценой альтернативного предложения (Цена^{а}) является стимулом для клиента принять альтернативное товарное предложение. Разница между ценностью нашего товарного предложения (Ценность^{ф}) и ценностью альтернативы является приростной ценностью и решение по ценовой стратегии связано с тем, какую часть приростной ценности удержать в качестве прибыли. Основным вопросом стратегии ценообразования становится решение о том, какую часть этой приростной ценности удержать в качестве прибыли, а какую уступить. Важной проблемой развития ценностного ценообразования в РФ является также нежелание руководства промышленных предприятий инвестировать в исследования разведывательных закупок на предмет определения реальных рыночных цен альтернативных предложений.

Поскольку ценовая стратегия должна быть определена по факту формулирования конкурентной стратегии, еще до момента инвестирования в производственные активы, основным вопросом становится оценка потребительской ценности товара для определенного рыночного сегмента [11]. На сегодняшний день отечественные промышленные предприятия крайне редко восприимчивы к ценообразованию на основе ценности в связи с его дороговизной и отсутствием полной ясности в определении потребительской ценности, проблемой выбора методов ее оценки.

Перечень существующих в мире подходов оценки потребительской ценности, а также рекомендации по применению методов оценки в зависимости от источников потребительской ценности призваны ускорить развитие в РФ ценообразования и позиционирования на основе ценности, а также сфокусировать ограниченные ресурсы российских производителей на развитии наиболее значимых элементов потребительской ценности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щеголев В.В. Методы оценки потребительской ценности промышленной продукции // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 3(99). – с. 197-201.
2. Anderson J.N., Kumar N., Narus J.A. Value Merchants: Demonstrating and Documenting Superior Value in Business Markets (1st ed.). – Harvard Business School press, 2007. – 240 p.
3. Christofer M. Value-In-Use Pricing // European Journal of Marketing. – 1982. – № 16(5). – P. 35-46.
4. Forbis J. and Mehta N. Value-Based Strategies for Industrial Products // Business Horizons. – 1981. – № 24. – P. 32-42.
5. Jackson R., Niedell L., Lunsford D. An empirical investigation of the difference between goods and services as perceived by organizational buyers // Industrial Marketing Management. – 1995. – № 24. – P. 99-108.
6. Nagle T., Holden R. (2002). Strategy and Tactics of Pricing, 3rd ed. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002. – 398 p.
7. Reuter V. What Good Are Value Analysis Programs // Business Horizons. – 1986. – № 29. – P. 73-79.
8. Ulaga W., & Chacour S.. Measuring customer-perceived value in business markets – a prerequisite for marketing strategy and implementation // Industrial Marketing Management. – 2001. – № 20. – P. 525-540.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 658.5.011

В.С. Бабанин

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ ЗАГОТОВОК



Виктор Сергеевич Бабанин, аспирант
Национальный Исследовательский Университет
информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8-905-266-81-63, E-mail: vsbabanin@mail.ru

Аннотация

В работе рассматриваются возможности проектирования параметрических моделей операционных заготовок в среде CAD-систем. Представлен макрос, позволяющий разрабатывать параметрические модели операционных заготовок в среде CAD-системы CATIA V5. Предложена методика переноса параметрической модели из среды CAD-системы в систему автоматизированного проектирования технологических процессов в виде XML-документа. Показана возможность использование формата SVG для вывода операционных эскизов.

Ключевые слова: конструктивный элемент, комплексный элемент, параметрическая модель, операционная заготовка, XML-документ, SVG-формат.

V.S. Babanin

PARAMETRIC MODELING OF OPERATIONAL WORKPIECES

Victor S. Babanin, St.Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics, Russia, e-mail: vsbabanin@mail.ru

Abstract

The article deals with the possibility of using CAD-systems in the design of parametric models of operational workpiece. Describes a method of preserving information about the parametric model from the CAD-system into automated design process using the XML-documents. It is shown the capabilities of the SVG-format for the operational sketches.

Key words: constructive element, complex element, details parametric model, operational workpiece, XML-document, SVG-format.

Введение

В условиях современного рынка предприятия для повышения своей конкурентоспособности стремятся выпускать продукцию более высокого качества, меньшей себестоимости и за меньшее время, чем конкуренты. Это приводить к усложнению технологической подготовки производства, которая занимает все больше и больше времени. Одним из обязательных этапов в решении задачи сокращения времени и стоимости проектирования и выпуска изделий является внедрение на предприятии информационных технологий. Проектирование операционных заготовок имеет большое значение при разработке и анализе технологических процессов и реализации сквозного цикла проектирование-производство с использованием современных компьютерных систем.

Одной из важнейших задач при проектировании операционных заготовок (ОЗ) является задача определения их формы и размеров. Современный подход к автоматизированному решению этой задачи основан на использовании CAD-систем, с помощью которых технолог имеет возможность проектировать 3-х мерные геометрические модели операционных заготовок (ТМОЗ). Операционные эскизы, необходимые для создания операционных карт, создаются проецированием моделей операционных заготовок на плоскость чертежа [1].

В автоматизированной системе технологической подготовки производства (АСТПП) информация о деталях может быть выражена в виде графических или параметрических моделей. Графические модели образуются при конструировании детали в CAD - системе. В АСТПП эти модели используются при проектировании операционных заготовок и для разработки управляющих программ обработки этих заготовок. Параметрические модели необходимы для проектирования технологических процессов. В настоящее время еще отсутствуют программные средства (трансляторы), позволяющие перевести графические модели детали в параметрические, поэтому возникает задача создания параметрических моделей деталей для последующего их использования при проектировании технологических процессов.

Операционные заготовки

Анализ возможностей современных CAD-систем показал, что наиболее целесообразным является способ создания ТМОЗ, при котором выполняется наращивание (наслоение) припуска на поверхности объекта, как для изменения размеров поверхностей, так и для закрытия обрабатываемых поверхностей. На кафедре технологии приборостроения НИУ ИТМО была разработана методика проектирования ОЗ с помощью добавляемых тел. Она основана на обратном преобразовании моделей ОЗ,

при котором преобразование начинается от модели детали и заканчивается получением модели исходной заготовки (рис. 1). Пример “наращивания” добавляемого тела на модель детали для получения модели ОЗ приведен на рис. 1.

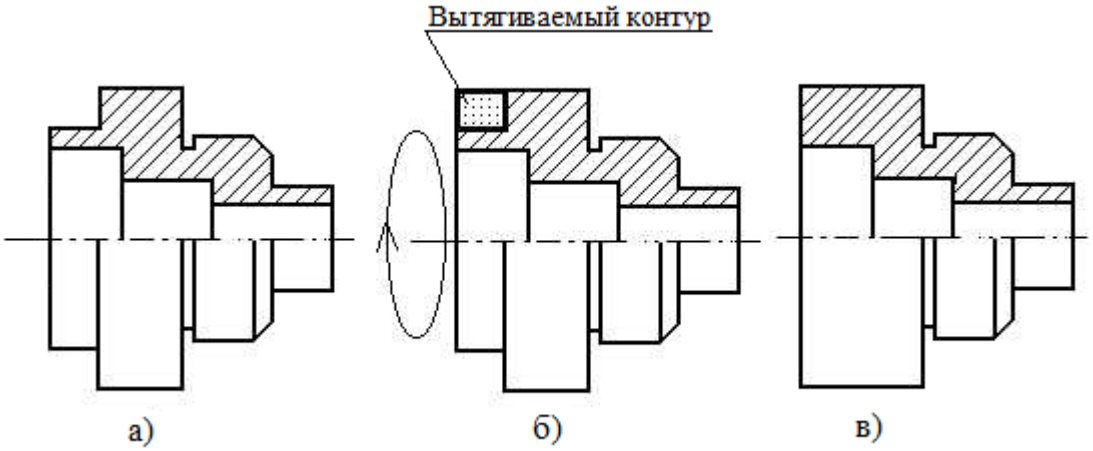


Рис. 1 а) исходная деталь, б) “наращивание” добавляемого тела, в) операционная заготовка

Операционные эскизы представляют собой 2D модели заготовки, которые доработаны и оформлены в соответствии с требованиями ЕСТД. Доработка заключается в простановке баз и операционных размеров (ОР), выдерживаемых на данной операции, а также в указании качества обрабатываемых поверхностей (шероховатость, твердость, покрытие и т.д.). Таким образом, на основании ТМОЗ создается карта с операционным эскизом. 3D модели заготовок в дальнейшем используются для получения с помощью CAM-систем управляющих программ для станков с ЧПУ.

Параметрическая модель детали

Одной из важнейших задач, связанных с повышением уровня автоматизации систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), является задача интеграции САПР ТП с CAD - системой, в среде которой создается 3D модель детали. Сложность задачи вызвана сложностью распознавания конструктивных элементов (КЭ), к которым привык технолог (канавки, пазы, уступы, отверстия и т. д.), причем использование нейтральных форматов типа STEP и IGES практически не облегчают задачу распознавания КЭ. Ввод в САПР ТП информации о КЭ детали позволяет использовать типовые планы обработки (ТПО) для этих КЭ и, следовательно, автоматически определять содержание технологических переходов. Использование ТПО позволяет на 30-40% уменьшить трудоемкость проектирования технологии изготовления деталей приборов и машин [2].

Один из возможных подходов решения данной задачи заключается в параметрическом моделировании деталей. В этом случае создается параметрическая модель детали (ПМД), которая содержит описание самой детали и, в частности, описание конструктивных элементов, из которых она состоит.

Параметрическая модель детали — это описание детали на языке текстового типа, отражающее деталь как иерархическую систему фреймов. С точки зрения системного подхода деталь, как система, должна иметь элементы и связи между ними. На рис. 2 представлена структура фреймов, используемая для описания ПМД.

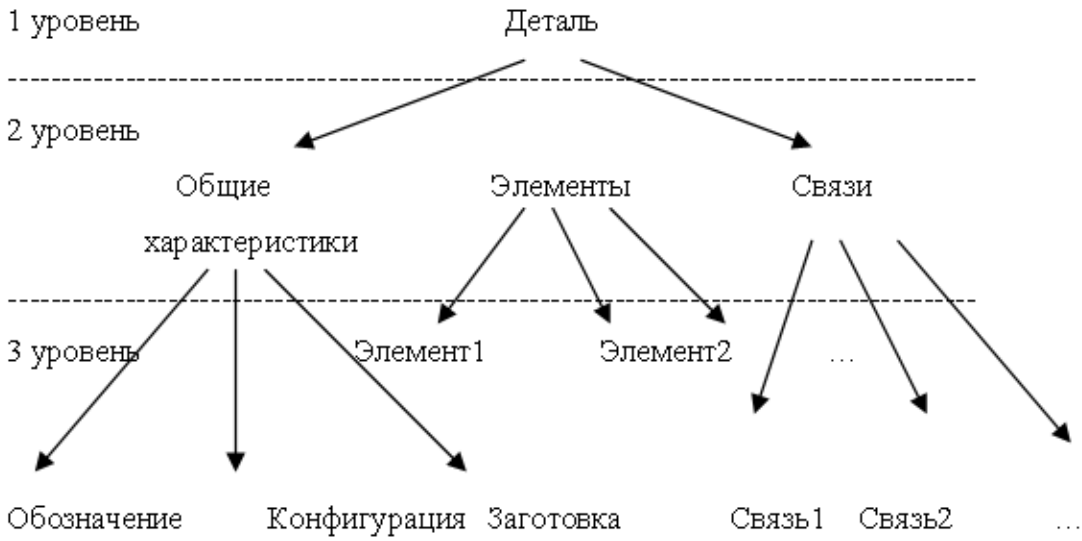


Рис. 2 Структура детали представляется в виде иерархической структуры фреймов

На первом уровне задается имя детали. Второй уровень предназначен для описания общих характеристик деталей, элементов, которые выделены у детали и связей между ними. На 3 уровне дается конкретное описание детали (обозначение, конфигурация, заготовка), подробно описываются все элементы, выделенные у детали и связи между этими элементами. Многоуровневый подход позволяет описывать ПМД с необходимой степенью детализации.

Макрос для создания параметрических моделей операционных заготовок

В настоящее время конструирование изделий основано на создании 3D моделей сборочных единиц и деталей. Поэтому задача совмещения процесса создания 3D моделей деталей и получения параметрических моделей деталей является актуальной.

В качестве основы для проведения исследований была выбрана система CATIA V5, как CAD/CAM/CAE система высокого уровня, обладающая большим набором функциональных возможностей, необходимых для решения поставленных задач. В частности, в CATIA V5 имеется развитая система программирования, позволяющая разрабатывать различные макросы. Кроме того, модуль *Functional Tolerancing & Annotations* системы CATIA позволяет непосредственно на 3D модели детали производить простановку размеров, шероховатостей, допусков относительного расположения поверхностей и т.д [3].

В системе CATIA V5 был разработан макрос, который позволяет выражать параметрические модели деталей в виде иерархии фреймов с любой степенью детализации. Синтаксически ПМД представляет собой XML – документ, хранение которого может выполняться в удаленной базе знаний. Работа с макросом заключается в проектировании конструктором ПМД с помощью комплексных элементов. Комплексный элемент – это конструктивный элемент, форма которого в определенных пределах зависит от параметров элемента. В ПМД вводится информация об общих характеристиках детали, о заготовке, о наличии покрытий, термообработке и т. д.

Рассмотрим работу макроса на примере комплексного элемента – цилиндра, открытого слева. В рабочем окне макроса пользователь может задавать значения необходимых параметров (рис. 3).

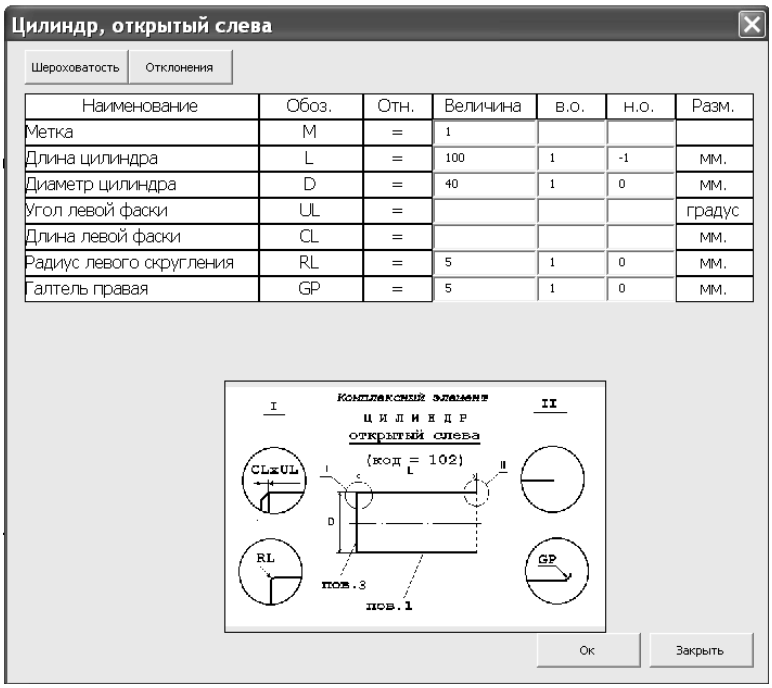


Рис. 3. Окно редактирования после ввода параметров комплексного элемента

Здесь же для удобства располагается схематическое изображение элемента. В рабочем окне могут быть введены номинальные значения размеров и величины отклонений, шероховатость поверхностей, допуски формы, может быть введена информация о наличии покрытий, о термообработке и т.д. На рис. 4 приведена 3D модель комплексного элемента с аннотациями.

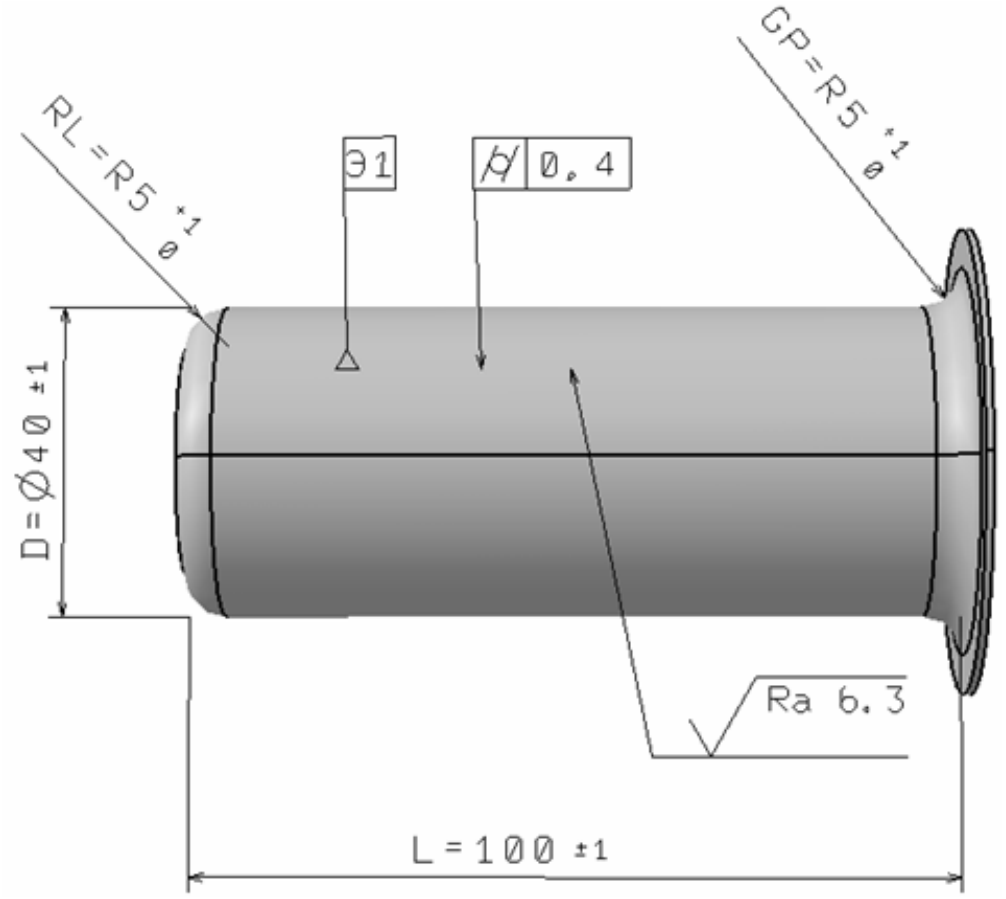


Рис. 4. Комплексный элемент с аннотациями

Использование формата XML для ПМД

После того, как пользователь завершит создание ПМД она может сохранена в базу данных в виде XML-документа [4]. Наиболее подходящим внутренним языком для параметрической модели детали является язык XML (*Extensible Markup Language*), т.к. он является удобным для передачи и обработки информации при решении технологических задач. С системных позиций деталь представляет собой иерархический объект с переменной структурой. Поэтому параметрическая модель детали может быть выражена как иерархия фреймов, слоты которых отражают параметры детали. Фреймовый подход позволяет описывать ПМД с любой необходимой степенью её детализации. В качестве примера на рис. 5

приведена запись двух слотов, выражающих параметры L и D для цилиндра, показанного на рис. 4.

```
<par> <lev1>3</lev1> <lev2>Э1</lev2> <lev3>102</lev3>
<name>Длина цилиндра</name>
<oboz>L</oboz>
<otn>=</otn>
<vel>100</vel>
<razm>мм</razm>
</par

<par> <lev1>3</lev1> <lev2>Э1</lev2> <lev3>102</lev3>
<name>Диаметр цилиндра</name>
<oboz>D</oboz>
<otn>=</otn>
<vel>40</vel>
<razm>мм</razm>
</par>
```

Рис. 5. Фрагмент XML-документа с параметрами КЭ “цилиндр, открытый слева”

Для вывода операционных эскизов используется язык разметки SVG (Scalable Vector Graphics).

К основным преимуществам SVG можно отнести:

– параметры, необходимые для прорисовки графики, уже содержаться в ПМД;

– нет необходимости в проецировании 3D модели операционной заготовки на плоскость чертежа;

– с операционными эскизами можно работать в браузере.

После завершения конструирования детали 3D модель детали, параметрическая модель (в виде XML – документа) и операционные эскизы (в формате SVG) сохраняются в базе данных. После чего ПМД может быть загружена в систему «ТИС-Процесс» для разработки технологического процесса с использованием типовых планов обработки.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– конструирование деталей с использованием макроса с предварительно созданной библиотекой конструктивных элементов позволяет существенно сократить временные затраты;

– ПМД возможно создавать непосредственно в среде CAD-системы;

– параметрическую модель в виде XML-документа можно использовать для интеграции САПР ТП с CAD – системой;

– язык разметки SVG можно использовать для отображения операционных эскизов;

– совместное использование макроса и системы «ТИС-Процесс» дает возможность для каждого КЭ выбирать из базы знаний их типовые планы обработки и, следовательно, автоматически определять те технологические переходы, которые необходимы для получения заданного конструктивного элемента, и применяемый инструмент.

Предполагается, что разрабатываемая система будет использована в учебном процессе кафедры технологии приборостроение НИУ ИТМО при выполнении курсовых и выпускных бакалаврских работ по направлению подготовки «Приборостроение».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Д.Д., Гусельников В.С., Бабанин В.С., Шувал-Сергеев Н.А. Проектирование операционных заготовок в среде CAD-систем // Методическое пособие, - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. - 60 с.
2. Куликов Д.Д., Бабанин В.С., Создание параметрической модели детали в среде CAD-системы// Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011.
3. Комисаренко А.Л. Создание 3D-аннотаций на виртуальной модели изделия // Методические рекомендации по лабораторному практикуму, - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. -19 с.
4. Хабибуллин И. Самоучитель XML, СПб.: БВХ-Петербург, 2003. – 336 с.

УДК 004.93

И.А. Васильев

МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫМИ АГЕНТАМИ



Иван Андреевич Васильев, аспирант
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени проф. М. А. Бонч-Бруевича
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (8911)731-1970, E-mail: ivan.3dgraphic@mail.ru

Аннотация

В работе рассматриваются современные системы распознавания эмоций. Предлагается описание системы эмоций, на основании которого строится формальная модельпредставления эмоций, включающая блоки распознавания и формирования эмоциональных реакций виртуальных агентов.

Ключевые слова: компьютерный, виртуальный агент, распознавание эмоций, модель эмоций.

I.A.Vasiliev

MODEL RECOGNITION AND FORMATION OF EMOTIONAL REACTIONS TO CONTROL VIRTUAL AGENT SYSTEMS

Ivan A.Vasiliev, the Bonch-Bruevich St.Petersburg State University of Telecommunications, Russia, e-mail: ivan.3dgraphic@mail.ru

Abstract

The paper reviews current system of recognition of emotions. A description of emotions, which is built on the basis of a formal model of representation of emotions, including the recognition unit and the formation of emotional responses of virtual agents.

Key words: computer, virtual agent, recognition of emotions, a model of emotion.

Введение

Широкое внедрение компьютерной техники сформировало инфокоммуникационную среду, которая стала неотъемлемой частью жизнедеятельности человека, но в активном развитии этой среды есть свои положительные и отрицательные аспекты влияния на поведение человека.

Время, которое человек проводит за компьютером увеличивается, стираются границы между рабочим и личным временем, реальным и виртуальным пространством. Возрастают когнитивные нагрузки, что приводит к возникновению отрицательных психологических и физиологических проблем. Негативные эмоции у человека накапливаются, что может приводить к срывам в его поведении. Эти срывы в свою очередь приводят к принятию неправильных решений, за которые, приходится расплачиваться, в том числе и человеческими жизнями.

Возрастает актуальность создания эффективных средств взаимодействия между устройством и человеком, когда компьютер предстает в роли активного помощника, виртуального агента. Эти средства должны учитывать процесс эмоциональной адаптации человека, иметь возможность распознавания эмоций, определения адекватных способов реагирования на них и формирования эмоциональных реакций, направленных на снижение уровня негативных влияний.

Современные системы распознавания эмоций

Эмоции играют одну из ключевых ролей, как в межличностных отношениях, так и в человеко-компьютерном взаимодействии. Системы распознавания эмоций определяют новое направление в решении многих важных задач. В качестве примера можно привести следующие: контроль эмоциональных состояний в условиях повышенного риска; повышение качества систем биометрического детектирования;анализ состояния здоровья по эмоциональным реакциям; наделение виртуальных агентов механизмом определения и распознавания эмоциональных реакций, что в свою очередь позволит определить новую модель поведения и сделает их более человечными.

С момента появления первых персональных компьютеров и до настоящего времени не теряет актуальности проблема создания эффективных средств взаимодействия между устройством и человеком.

Компьютерные интерфейсы должны быть ориентированы, в первую очередь, на возможности человека [7], на его стремление межличностного взаимодействия, а компьютер предстает в роли активного помощника, виртуального агента, ведущего с пользователем естественный диалог.

В настоящее время существует множество систем реализующих подобный подход в качестве примера можно привести виртуальных агентов,

разрабатываемых Guile 3D Studio[12]. Стоит отметить, что реализация эмоциональных реакций в этих моделях слабо прорабатывается и ориентирована на шаблоны.

Первые опыты использования распознавания эмоций в системах управления техникой начались в 1995 году с работы Rosalind W. Picard «AffectiveComputing»[10]. Один из первых проектов реализованных группой использовал эмоциональные реакции человека как средство управления персонажами игры (AffQuake)[13]. Реализован был проект, известный как Affdex, в котором собираются и анализируются данные об эмоциональных состояниях людей в сети интернет. Анализ проводился с помощью видеоданных. Достаточно часто применяются системы оптического распознавания. В общем случае принципом работы практически всех таких систем является выделение мимических реакций и анализ пространственных отношений. Большой популярностью пользуется модель активных контуров (ActiveShapeModel)[6].

Проблемой эмоций занимались многие известные психологи и физиологи: Ч. Дарвин, 3. Фрейд, Г. Спенсер, Д. Линдсли, У. Джеймс, К. Ланге, У. Кэннон, Ф. Бард, Л. Фестингер, К. Додонов, А.Н Леонтьев, И.В. Симонов, Е.П. Ильин, И.Б. Фоминых и др. Тем не менее, до сих пор нет общепринятого определения понятия эмоций, а также и общепринятой классификации эмоциональных реакций.

Из существующих теорий можно выделить ряд положений важных для моделирования эмоций.

Эмоции, рассматриваются как определенная подсистема человека, которая имеет качества присущие самоорганизующимся системам: динамика, открытость, неравновесность. Подобные системы подчиняются определенным правилам эволюции, для описания которых используется дарвиновская триада: наследственность, изменчивость, отбор. Появляясь на свет, человек уже обладает некоторой базовой системой эмоций, на что указывал Чарльз Дарвин в труде «Выражение эмоций у человека и животных»; здесь же он предположил связь между рефлекторными действиями и эмоциями. Помимо Дарвина И.М. Сеченов в статье «Рефлексы головного мозга»[4] утверждает тезис о том, что все внешние проявления мозговой деятельности могут быть сведены на мышечное движение.

Современная нейрофизиология определяет положение центра эмоционального реагирования в лимбической системе. Лимбическая система, обрабатывая информацию, поступающую с различных органов чувств, запускает вегетативные и соматические процессы, обеспечивающие адекватную реакцию организма на внешние раздражители. Для выживания в определенных ситуациях организм должен работать на пределе своих возможностей, эмоции позволяют контролировать этот процесс, активируя определенные шаблоны поведения. В результате срабатывания подобных шаблонов в организме происходят разнообразные внутренние процессы:

выделяются различные гормоны, усиливается работа органов чувств, происходят изменения в работе сердечной мышцы, дыхательной системы, мышечной системы. Все эти процессы находят свое отражение во внешних реакциях человека. Эмоции создают мотивацию и прочное закрепление в памяти образов важных для выживания, что способствует быстрому выбору шаблона поведения в некоторой подобной ситуации.

Многие представленные моменты лучшим образом выражаются через когнитивную теорию эмоций. Здесь стоит отметить несколько ключевых моментов. Как отмечает М. Б. Арнольд: для эмоции характерны интуитивные отношения пользы/вреда[5]. Р. Лазарус выделяет в составе эмоции первичную и вторичную оценку. Первичная – это оценка ситуации, вторичная – оценка субъектом своегособственного отношения к этой ситуации [8,9].С.Л. Рубинштейн указывал на то, что эмоции выражают состояние субъекта и его отношение к окружающему [3].

Эти положения целесообразно использовать при построении моделей представления эмоций и моделей поведения виртуальных агентов, через распознавание и формирование эмоциональных реакций.

Формальная модель представления эмоций

При построении формальной модели представления эмоций процессы распознавания и активации эмоциональных реакций рассматриваются взаимосвязано в едином пространстве, подобно тому, как это осуществляется в мозгу человека. В литературных источниках [2,10,11] представлены модели с аналогичным подходом, однако в этих работах авторы не выделяют необходимость представления четкой связи между восприятием и эмоцией.

Для последующего описания модели эмоций необходимо ввести несколько определений.

Ощущение – сенсорная информация, представленная одним органом чувств.

Образ – совокупность сенсорной информации, представленной различными источниками, формирующей целостное представление о предмете.

Представление – предыдущий эмоционально подкрепленный опыт взаимодействия с предметом.

Эмоциональное напряжение – количественная мера эмоциональной активности, характеризующая активационную способность организма противодействовать внешним негативным факторам; выражается через вегетативные реакции, происходящие на почве эмоциональных всплесков.

Эмоциональный всплеск – состояние повышенной эмоциональной активности, отвечающее изменениям внешней среды или внутренним процессам осмысления ситуаций.

Эмоциональный тон – характеристика эмоций, определяющая оценочное восприятие события. Различают два вида эмоций по эмоциональному тону: положительные и отрицательные.

На основании анализа существующих в психологии концепций (в основном это когнитивные теории эмоций),процесс формирования человеческих эмоций, описывается следующим образом.

Первый этап – информация, поступающая от органов чувств, формирует чувственный образ объективной действительности в лимбической системе. Вторым этапом является первичное опознание образа. Если в процессе первичного опознания объект не проявил себя в сравнении с предыдущими представлениями, происходит актуализация данного образа (объект становиться интересен[1] для изучения), происходит переключение внимания на новый объект. Выделяется нейромедиатор подкрепления. Эмоция интереса будет действовать до тех пор, пока нейромедиатор не растворится. Далее происходит вторичная оценка. В процессе вторичной оценки определяется степень важности предмета в текущей ситуации для человека, а также оценка ресурсов, которые он может потратить на исследования, то есть оценка уровня затрат [2] и вероятность достижения цели. Разница между «желанным» и «возможным» определяет уровень эмоциональной напряженности ситуации. В момент эмоционального напряжения могут протекать различные эмоции в зависимости от конкретной ситуации и, соответственно, происходить различные двигательные реакции. В процессе вторичной оценки мозг строит шаблоны действий на основании предыдущего опыта. Каждый такой шаблон, своего рода внутренний образ событий, пропускается через цикл вторичной обработки и ему дается положительный или отрицательный эмоциональный отклик. Каждый подобный отклик либо увеличивает, либо уменьшает эмоциональное напряжение в зависимости от знака. Эмоциональная переработка информации основана на чисто количественном подходе. Положительные эмоции снижают отрицательное напряжение и наоборот. Эмоции в подобной схеме ответственны за выбор из множества шаблонов поведения, а также за последующее сохранение образа. Каждый шаблон в результате обработки попадает центр шаблонных реакций, где размещается в зависимости от возможной выгоды. Если ситуация не очевидна, уровень эмоциональной напряженности будет расти, пока не достигнет критического уровня, в результате происходит спонтанный выбор из множества подготовленных шаблонов.

Основные блоки формальной модели, соответствующей предложенному описанию системы эмоций, представлены на рисунке 1.

[1]Интерес по классификации К.Э.Изарда относиться к базовым эмоциям[1,с.105]

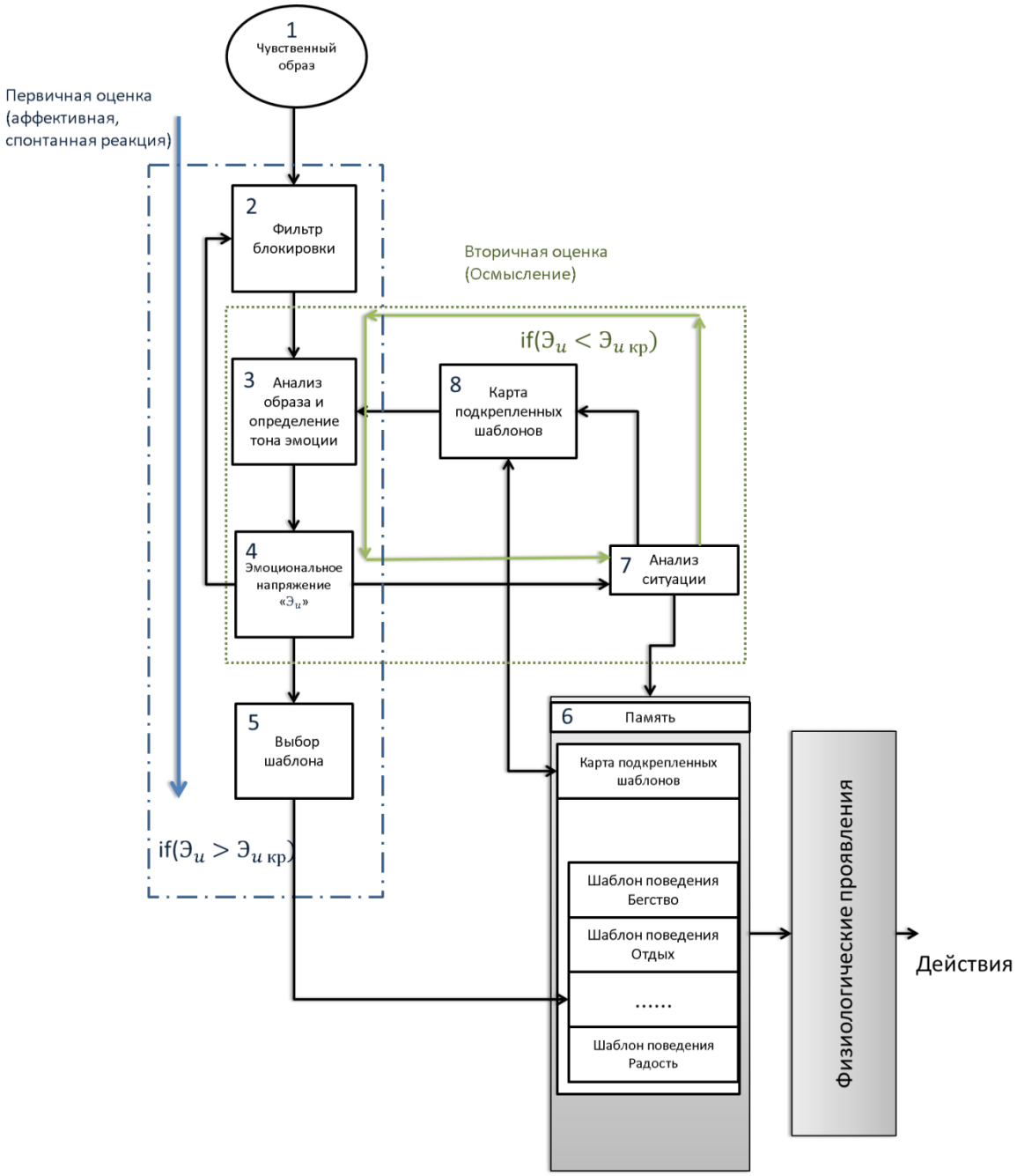


Рис. 1. Формальная модель распознавания и активации шаблонов поведения

Рассмотрим логику работы некоторых блоков схемы, представленных на рис. 1.

1. Чувственный образ – представляет собой информацию, которая поступает с фильтров первичной обработки. Вид информации, концептуально, не должен сказываться на характере работы схемы, здесь может применяться как графическая, так и аудиальная информация.

2. Фильтр блокировки – уменьшает количество информации поступающей в систему, пока выполняется цикл вторичной обработки. Этот фильтр реализует простую схему внимания. Фильтр работает тогда, когда есть эмоциональная напряженность. Задачей фильтра является снижение уровня эмоциональной нагрузки в момент поиска решений для текущей ситуации.

3. Блок анализа образа осуществляет сравнение текущего образа с образами, закрепленными в ходе предыдущего опыта. Первичный уровень обработки - образы получившие максимум эмоционального напряжения в момент формирования. Здесь могут использоваться различные классификаторы, в качестве примера можно обозначить нейронные сети.

4. Блок эмоционального напряжения представлен сумматором, определяющим эмоциональное напряжение. Здесь происходи постепенное накопление данных эмоционального напряжения, которые мы получаем с предыдущего образа. Задача – увеличение энтропии поведения.

5. Блок выбора шаблона поведения представляет собой стохастическую модель. Выбор определяется через модель представления данных (рис. 2). Неравномерность выбора шаблонной реакции определяет сила эмоционального напряжения, что позволяет определять новые формы поведения.



Рис. 2. Модель представления данных

Эмоция в обозначенном представлении, в отличие от принятых моделей, определяется не на прямую, с помощью классификатора, а через двумерную модель, в которой отражены две составляющие эмоционального процесса: эмоциональное напряжение и эмоциональный тон.

6. Память хранит шаблоны поведения.Шаблоны размешаются в памяти в определенном порядке. Наибольший приоритет получают базовые

эмоциональные реакции. Далее идут реакции, полученные в ходе естественного опыта. Каждый шаблон реализует в себе некоторую стратегию поведения, например: стратегия избегания опасности; стратегиюоправданного риска.

7. Блок анализа определяет несколько моделей развития событий текущей ситуации. Каждый шаблон мысленного моделированиятакже пропускается через цикл первичной обработки, где определяется выгода или потери при выбранной стратегии поведения.Из всех возможных стратегий выбирается наиболее выигрышная. Простейший способ реализации этого блока в виде алгоритма поиска пути, где агент будет оценивать различные варианты и в конечном итоге выберет путь сулящий большее эмоциональное подкрепление.

8. Когда ситуация разрешается образ о текущем событии сохраняется в карте подкрепленных шаблонов. Продолжительность хранения, а также положение в иерархии образов зависит от эмоциональной напряженности, которая сопутствовала событию.

Система распознавания

Здесь в общем виде представлены наиболее важные этапы построения описанной модели. Распознавание осуществляется с помощью блоков 3 и 4. Эмоции - динамический процесс, поэтому необходимо определить способ поиска динамики в кадре. Наиболее быстрый способ оценки движения выполняется с применением межкадровой разности:$I(x,y,t) - I(x,y,t-1) = M(x,y,t)$, где M – маска движения в момент t, $I(x,y,t)$ – изображение в текущий момент времени, $I(x,y,t-1)$ – изображение в предыдущий момент. Следующим этапом является бинаризация. После бинаризации, зачастую, необходимо проводить чистку материала от шумов. Для этого нужно выполнить некоторые морфологические операции, например операции открытия $O(M,B) = \cup_{\beta \epsilon B}(\cup_{\beta \epsilon B}(M+\beta)+\beta))$, где B – бинарный структурирующий элемент, β – пиксель структурирующего элемента, $O(M,B)$ – результирующий растр. Ищем связность в полученном растре волновым методом, определяем область интереса. Проводим обработку в полученном окне над $I(x,y,t)$. Определяем ключевые точки и рассчитаем в них значение банка фильтров Габора $G_i = \frac{k_i^2}{\sigma^2}\exp\left(-\frac{k_i^2 x^2}{2\sigma^2}\right)[\exp(ik_i x) - \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)]$, G_i- ядро фильтра, где $k_i = (k_v cos\varphi_\mu, k_v sin\varphi_\mu)$, $k_v = 2^{-\frac{v+2}{2}}(0 \le v \le 4)$, $\varphi_\mu = \mu\frac{\pi}{8}(0 \le \mu \le 7)$.

Получаем jet’ы контрольных точек.

В качестве классификатора воспользуемся нейронной сетью с двумя скрытыми слоями и сигмоидальной функцией активации.

$OUT = \frac{1}{1+\exp(-\alpha Y)}$. Обучение проводим на выборке изображений базовых эмоций. Каждая базовая эмоция заранее определена на модели эмоций в следующем виде $Э_б \ni (Э_{иб}, З_{эб})$, где $Э_{иб}, З_{эб}$ – некоторые константы определяющие эмоциональное напряжение и знак базовых эмоций. Классификатор позволяет получить знак эмоций как степень соответствия текущей мимической реакции шаблону, по которому проводилось обучение. Величина эмоционального напряжения в схеме распознавании определяется как $Э_u = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} M(x,y,t)$, где N - заданное количество кадров; базовые эмоции обладают начальным уровнем $Э_u$. Процесс выбора шаблона реакции может быть описан Марковской моделью управляемой $Э_u$.

Заключение

В настоящей статье представлена формальная модель эмоций, основанная на некоторых важных аспектах отраженных в когнитивной теории эмоций.

Эмоция в представленной модели, в отличие от известных, определяется не с помощью классификатора, а через двумерную модель, в которой введены две составляющие эмоционального процесса: эмоциональное напряжение и эмоциональный тон. Предполагается, что подобное представление позволит формировать адекватный ответ компьютерного агента на некоторые действия пользователя.

При построении формальной модели представления эмоций процессы распознавания, формирования и активации эмоциональных реакций рассматриваются взаимосвязано в едином пространстве.

Представлен пример возможной реализации алгоритма рассматриваемой модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изард К.Э. Психология эмоций.– СПб.: Мастера Психологии, Питер, 2007.
2. Леонтьев В.О., Аккредо А.К. Формулы эмоций // Доклад на XI конференции по искусственному интеллекту, 2008.,URL: http://www.raai.org/cai-08/files/cai-08_paper_165.doc
3. Рубинштейн С.Л. Основы общей психологии. – СПб: Питер, 2000.
4. Сеченов И.М. Рефлексы головного мозга. // В кн.: Сеченов И.М., Павлов И.П., Введенский Н.Е. Физиология нервной системы. Избранные труды. Выпуск 1. Под общей редакцией академика К.М. Быкова.

5. Arnold, M.B. Emotion and Personality. – New York: Columbia University Press, 1960.
6. Cootes T.F., Taylor C.J., Cooper D.H., Graham J. Active shape models—their training and application // Computer Vision and Image Understanding. 1995. –Vol. 61 1. –P. 38–59.
7. J.L. Flanagan and T. S. Huang, 1997// NSF Workshop on human-centered systems: information, interactivity, and intelligence, URL: http://www.ifp.uiuc.edu/nsfhcs/
8. Lazarus, R.S. Emotion and Adaptation. // In: J. Jenkins, K. Oatley, N. Stein (Eds.). Human Emotions. A Reader. – Malden, MA: Blackwell Publishers, 1998. – P. 38-44.
9. Lazarus, R.S. Progress on a Cognitive-Relational-Motivational Theory of Emotion. //American Psychologist, 1991. – V. 46 (8). – P. 819-834.
10. R. W. Picard / Affective Computing /MIT Media Laboratory; Perceptual Computing; Cambridge, picard@media.mit.edu, URL: http://www.media.mit.edu/~picard/
11. Steunebrink, B.R., Dastani, M.M. & Meyer, J-J.Ch. (2008). A Formal Model of Emotions: Integrating Qualitative and Quantitative Aspects. In G. Mali, C.D. Spyropoulos, N. Fakotakis& N. Avouris (Eds.), Proc. 18th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'08) (pp. 256—260). Greece/Amsterdam: Patras / IOS Press
12. Guile 3D Studio. URL: https://guile3d.com/en/guile-3d/
13. AffQuake . URL: http://affect.media.mit.edu/projects.php?id=180

УДК 532.546+519.642.6

Е.Н. Панюшкина, П.А. Шаманаев, Н.И. Наумкин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНОГО ПРОЦЕССА ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ РАЗРЫВНОГО МЕТОДА ГАЛЕРКИНА



Елена Николаевна Панюшкина, аспирант кафедры прикладной математики Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева,
Россия, Саранск, тел./факс (8-8342) 233205
E-mail: naumkinaen@yandex.ru



Павел Анатольевич Шаманаев, к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой прикладной математики
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева,
Россия, Саранск, E-mail: korspa@yandex.ru.



Николай Иванович Наумкин, д.п.н, к.т.н, доцент, заведующий кафедрой основ конструирования механизмов и машин
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева,
Россия, Саранск,
тел./факс (8-8342) 254386, E-mail: naumn@yandex.ru

Аннотация

Рассматривается использование разрывного метода Галеркина для численного решения уравнения двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей.

Ключевые слова: уравнения двухфазной фильтрации, разрывный метод Галеркина, квадратурные формулы, поток Годунова, лимитеры.

E.N. Panyushkina, P.A. Shamanaev, N.I.Naumkin

NUMERIC MODELING OF UNIDIMENSIONAL TWO-PHASE FLOW WITH DISCONTINUOUS GALERKIN METHOD

E. N. Panyushkina[1], e-mail: naumkinaen@yandex.ru;
P.A. Shamanaev[1], e-mail: korspa@yandex.ru;
N.I.Naumkin[1], e-mail: naumn@yandex.ru.
[1]Ogarev Mordovia State University

Abstract

We consider the use of a discontinuous Galerkin method for the numerical solution of two-phase flow of immiscible fluids.

Keywords: two-phase filtration, discontinuous Galerkin method, quadrature formulas, Godunov flow, limiters.

В настоящее время для решения задач гидро- и газодинамики наблюдается возрастающий интерес к разрывному методу Галеркина. Основными чертами этого метода являются высокий порядок точности, нелинейная устойчивость, возможность применения для решения задач со сложной геометрией, расчет решений, содержащих разрывы. В данной статье описано применение разрывного метода Галеркина для моделирования двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей в одномерном случае.

Постановка задачи

Рассмотрим одномерный двухфазный поток несмешивающихся и несжимаемых жидкостей через несжимаемую пористую среду в отсутствии гравитационных и капиллярных эффектов при заданном суммарном расходе фаз(модель Баклея - Леверетта):

$$m\frac{\partial S}{\partial t}+Q(t)\frac{\partial f(S)}{\partial x}=0\ , \qquad (1)$$

где $x\in[0,L]$ – пространственная координата; *L*-длина одномерной системы; где происходит фильтрация; $t\in[0,T]$–время; *S(x,t)* – насыщенность порового пространства смачивающей фазой; *m* –пористость; $f(S)=k_1/(k_1-\mu k_2)$ – коэффициент подвижности вытесняющей фазы; $k_i=k_i(S)$ - относительные фазовые проницаемости; $\mu=\mu_1/\mu_2$ –вязкости фаз.

Введем безразмерные переменные $\bar{x}=x/L$, $\bar{t}=(mL)^{-1}\int_0^t Q(t)dt$ (в дальнейшем черту над безразмерными переменными опускаем). При этом уравнение (1) запишется в виде:

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial f(S)}{\partial x}=0 \qquad (2)$$

Для уравнения (2) будем рассматривать начально-краевую задачу:

$$S\big|_{x=0}=1,\ S\big|_{t=0}=S^0(x) \qquad (3)$$

Для простоты относительные проницаемости будем рассматривать только как функции насыщенности:

$$k_1=S^2,\ k_2=(1-S)^2 \qquad (4)$$

Осуществлено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания, проект 53/18 – 12 «Формирование у студентов национальных исследовательских университетов компетентности в инновационной инженерной деятельности на основе погружения в инженерное творчество».

Таким образом, получим выражение для коэффициента подвижности вытесняющей фазы:

$$f(S) = \frac{S^2}{S^2 - \mu(1-S)^2} \tag{5}$$

Описание численного алгоритма решения задачи разрывным методом Галеркина

На отрезке $[0, L]$ введем равномерную сетку с узлами $\{x_{j+1/2}\}$, $j = 0, \ldots, N$ и обозначим $I_j = \left[x_{j-1/2}, x_{j+1/2}\right]$, $h = x_{j+1/2} - x_{j-1/2}$, $j = 1 \ldots N$.

Умножим уравнения (2), (3) на произвольную гладкую функцию $v(x)$ и проинтегрируем произведение по I_j. Интегрирование по частям даст следующие выражения:

$$\begin{aligned} &\int_{I_j} \frac{\partial S}{\partial t} v(x)dx - \int_{I_j} f(S(x,t)) \frac{\partial v(x)}{\partial x} dx + f(S(x_{j+1/2}, t))v(x_{j+1/2}) - \\ &- f(S(x_{j-1/2}, t))v(x_{j-1/2}) = 0, \\ &\int_{I_j} S(0,x)v(x)dx = \int_{I_j} S^0(x)v(x)dx \end{aligned} \tag{6}$$

Для каждого момента времени $t \in [0, T]$ приближенное решение $S_h(x,t)$ будем искать как элемент конечномерного пространства

$V_h = V_h^k = \left\{v_h \in L_1(0,L) : v_h\big|_{I_i} \in P^k(I_j), j = 1, \ldots, N\right\}$, где

$P^k(I_j)$ - пространство полиномов степени не выше k на I_j.

При замене гладкой функции $v(x)$ пробной v_h из пространства V_h, а точного решения S приближенным S_h, возникает необходимость замены функции $f(S_h(x_{j+1/2}, t))$ численным потоком h, зависящим от предельных значений функции S_h справа и слева от точки $x_{j+1/2}$. Тогда уравнения (6) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} &\int_{I_j} \frac{\partial S_h}{\partial t} v_h(x)dx - \int_{I_j} f(S_h(x,t)) \frac{\partial v_h(x)}{\partial x} dx + h(S_h(x^-_{j+1/2}), S_h(x^+_{j+1/2}))v_h(x^-_{j+1/2}) - \\ &- h(S_h(x^-_{j-1/2}), S_h(x^+_{j-1/2}))v_h(x^+_{j-1/2}) = 0, \end{aligned} \tag{7}$$

$$\int_{I_j} S_h(0,x)v_h(x)dx = \int_{I_j} {S_h}^0(x)v_h(x)dx$$

Будем использовать численный поток Годунова:

$$h^G(a,b) = \begin{cases} \min\limits_{a \le S \le b} f(S), & a \le b \\ \max\limits_{b \le S \le a} f(S), & a > b \end{cases}$$

В качестве пробных функций на каждом из отрезков I_j возьмем систему функций $\{\varphi_i\} \in P^1$, где P^1 - пространство полиномов степени не выше 1:

$$\begin{cases} \varphi_0 = 1, \\ \varphi_1 = x - x_c, \end{cases}$$

где x_c - центр отрезка I_j, $x_c = \dfrac{x_{j+1/2} + x_{j-1/2}}{2}$.

Решение будем искать в виде:

$S_h(x,t) = \varphi_0 S_0 + \varphi_1 S_1 = S_0 + S_1(x - x_c)$, $S_0 = S_0(t), S_1 = S_1(t)$. Тогда система (7) для каждого отрезка I_j будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S_0}{\partial t} \int\limits_{I_j} dx + \dfrac{\partial S_1}{\partial t} \int\limits_{I_j} (x - x_c)dx + h(S_h(x^-_{j+1/2}), S_h(x^+_{j+1/2})) - \\ - h(S_h(x^-_{j-1/2}), S_h(x^+_{j-1/2})) = 0, \\ \dfrac{\partial S_0}{\partial t} \int\limits_{I_j} (x - x_c)dx + \dfrac{\partial S_1}{\partial t} \int\limits_{I_j} (x - x_c)^2 dx - \int\limits_{I_j} f(S_h(x,t))dx + \\ h(S_h(x^-_{j+1/2}), S_h(x^+_{j+1/2}))(x_{j+1/2} - x_c) - h(S_h(x^-_{j-1/2}), S_h(x^+_{j-1/2}))(x_{j-1/2} - x_c) = 0, \end{cases} \tag{8}$$

Система (8) представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, не разрешенных относительно производных и может быть записана в виде:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial S_0 / \partial t \\ \partial S_1 / \partial t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1^* \\ f_2^* \end{pmatrix}, \tag{9}$$

где коэффициенты системы представляют собой скалярные произведения базисных функций.

Система уравнений для начальных данных имеет вид:

$$\begin{cases} S_0 \int\limits_{I_j} dx + S_1 \int\limits_{I_j} (x - x_c)dx = \int\limits_{I_j} S^0(x)dx, \\ S_0 \int\limits_{I_j} (x - x_c)dx + S_1 \int\limits_{I_j} (x - x_c)^2 dx = \int\limits_{I_j} S^0(x)(x - x_c)dx \end{cases} \tag{10}$$

Входящие в состав систем интегралы вычисляются с помощью квадратурных формул Гаусса на шаблоне из трех точек.

Система (9) представляет собой систему алгебраических уравнений, решив которую, получим коэффициенты S_0 и S_1 разложения начальных данных по базисным функциям на каждом из отрезков $I_j = \left[x_{j-1/2}, x_{j+1/2}\right]$.

Для вычисления коэффициентов разложения решения по базисным функциям на следующем временном слое используется метод Эйлера:

$$\begin{aligned} S_0^{i+1} &= S_0^i + S_0^* \tau, \\ S_1^{i+1} &= S_1^i + S_1^* \tau \end{aligned}, \tag{11}$$

где $i = 0,...,M$; τ – шаг по времени; S_0^* и S_1^* – решения системы (9).

Прямой расчет коэффициентов по формулам (8) и (9) не даст хороших результатов из-за возникновения осцилляций в области разрывов. Для обеспечения монотонности схемы на каждом временном шаге используются специальные ограничители. Для линейной функции действие лимитирующего оператора можно описать в виде:

$$\Lambda\Pi_h S = S_0 + \widetilde{S}_1(x - x_c) \tag{12}$$

$$\widetilde{S}_1 = \min\mathrm{mod}\, K(S(x_{j+1/2}) - S_{0j}, \alpha(\bar{S}_{j+1/2} - S_{0j}), \alpha(S_{0j} - \bar{S}_{j-1/2})), \tag{13}$$

где S_0 – среднее интегральное значение на интервале I_j; $\alpha \in [1,2]$;

$\bar{S}_{j+1/2} = \dfrac{S_{0j} + S_{0j+1}}{2}$; $\bar{S}_{j-1/2} = \dfrac{S_{0j} + S_{0j-1}}{2}$; $\min\mathrm{mod}\, K(a_1,\ldots,a_N) = sign(a_1)\min(|a_1|,\ldots,|a_N|)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г.И. Баренблатт., В.М. Ентов, Е.М. Рыжик. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра. – 1984. – 211 с.
2. О.Б. Бочаров, И.Г. Телегин. Сравнительный анализ некоторых схем для задачи двухфазной фильтрации без учета капиллярных сил // Вычислительные технологии. – 2003. – Т.8. - №4 – С. 23-31.
3. М.Е. Ладонкина, О.А. Неклюдова, В.Ф. Тишкин. Исследование влияния лимитера на порядок точности решения разрывным методом Галеркина // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. – 2012. - №34. – 31 с.
4. В.Е. Лялин, К.А. Сидельников. Аналитические решения некоторых задач многофазной многокомпонентной фильтрации // Нефтегазовое дело. – 2005. - №1. – С.79-92.
5. B. Cockburn. Discontinuous Galerkin Methods for Convection-Dominated Problems // J. Sci. Comp. - 2001. - V. 3. - P. 173–261.

УДК 621:658.512:65.011.56

К.П. Помпеев

РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ НАДЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



Кирилл Павлович Помпеев, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110108265, E-mail: kirpom@rambler.ru

Аннотация

Представлена принципиальная схема системы интерактивного синтеза маршрута единичного ТП на основе структурного синтеза связей и его последующего размерно-точностного анализа. Описана методика составления схем биений для проверки возможности выполнения технических требований чертежа, расчета диаметральных операционных размеров и припусков на обработку. Описана методика определения типов и классов точности приспособлений, необходимых для реализации спроектированной технологии механической обработки заготовок деталей типа тел вращения.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, САПР ТП, алгоритм проектирования маршрутного технологического процесса, надежность технологического процесса по обеспечению точности, структурный синтез связей, размерно-точностной анализ, механическая обработка.

K.P. Pompeev

DIMENSIONAL ACCURACY ANALYSIS FOR AUTOMATED DESIGN OF RELIABLE TECHNOLOGIES

Dr. Kirill P. Pompeev, St.Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics, e-mail: kirpom@rambler.ru

Abstract

In this article we present an action chart of interactive synthesis system for development of a single flow process based on a structure correlation synthesis. We specify the methodology of rotational errors schemes compiling, calculation of diametrical operational dimensions and dimensional allowances. Also we

define the methodology of determination the types and accuracy ratings of tools for realization of engineered mechanical treatment technology.

Key words: CAD, CAPP, manufacturing process engineering algorithm, reliability of manufacturing process accuracy, structure correlation synthesis, dimensional accuracy analysis, mechanical treatment.

Значительно сократить затраты и сроки на освоение новых изделий позволяют интегрированные системы автоматизированной технологической подготовки производства, в состав которых входят системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), результатом работы которых должны быть во-первых экономически эффективные технологии, а во-вторых надежные технологии с точки зрения обеспечения точности. Определение экономической эффективности технологического процесса характеризуется разработкой его вариантов, расчетом для них технико-экономических показателей и их сравнением для выбора наиболее выгодного варианта. Надежное обеспечение точности означает, что такие технологические процессы уже на стадии их проектирования должны гарантировать, что при их реализации будут обеспечены точностные параметры изготавливаемых изделий. Поэтому под надежностью технологических процессов механической обработки заготовок будем понимаеть их свойство обеспечивать точность и качество деталей, заданные чертежом, на разных этапах их изготовления, при условии сохранения на этих этапах требуемых технических параметров в установленных пределах, с учетом обработки заготовок в определенной последовательности, на выбранном оборудовании, в требуемой технологической оснастке, необходимым инструментом и при заданных режимах обработки [3].

Оценить надежность ТП по парамерам точности, ожидаемую при его реализации, можно по показателю запаса точности [2, 3]. Он характеризует отношение ($\psi = IT_{Xi} / \omega_{Xi}$) допустимой величины изменения (IT_{Xi}) точностного параметра (X_i) ТП к его погрешности (ω_{Xi}), ожидаемой при реализации ТП. Иными словами, надежность ТП, согласно [2], можно связать с надежностью обеспечения требуемой точности обработки заготовок без брака. При условии $1 < \psi \le 1{,}2$, а тем более $\psi > 1{,}2$, надежность ТП по параметрам точности будет гарантирована. Чем этот показатель больше, тем выше ожидаемая надежность ТП (она будет зависеть только от правильности настройки системы «Обработка» и ее технического состояния при реализации ТП в реальных производственных условиях). Рассчитать показатель запаса точности для каждого размера и технического требования (несоосности, биения) можно только после проведения размерно-точностного анализа технологического процесса, спроектированного с использованием САПР ТП. Поэтому методом

проектирования надежных технологий в этих системах с целью учета индивидуальных особенностей изготавливаемых деталей должен быть синтез технологических структур с их последующим размерно-точностным анализом. При этом для возможности проведения оценки надежности ТП по параметрам точности в системе должны быть предусмотрены отдельные уровни проектирования маршрутной технологии, связанные с решением задач автоматизированного определения (выбора) технологических баз и станочных приспособлений, а также размерного синтеза и анализа ТП. В силу того, что решение ряда задач еще полностью не формализовано, режим работы таких системах остается интерактивным.

Интерактивный синтез ТП связан с устанавлением планов обработки поверхностей, определением этапов обработки заготовки, распределением между собой этапов механической и немеханической обработки, определением состава операционных комплексов, схем базирования, используемых приспособленний и применяемого оборудования.

Специфика технологического проектирования состоит в том, что поиск наиболее эффективного решения производится в обширном пространстве при необходимости учета большого количества факторов и ограничений. Это обусловило необходимость декомпозиции общей задачи и реализации ее решения в несколько этапов, образующих иерархическую структуру. Последовательность выполнения этапов определяется заранее заданной стратегией, имеющей обратные информационные связи лишь между смежными этапами [9]. Разработка технологического процесса (в данном случае его маршрутного описания) осуществляется при этом с постепенной детализацией и корректировкой проектных решений. Учитывая указанные особенности принципиальная схема системы проектирования маршрута единичного ТП имеет вид, показанный на рис. 1.

Перечень задач, решаемых при автоматизированном проектировании маршрута ТП, приведен в [10]. При этом обеспечение надежности ТП по параметрам точности осуществляется при решении задач третьего, четвертого и пятого уровней проектирования. Поэтому поясним особенности решения некоторых из них.

На обеспечение точности изготовления деталей влияют:

– базирование заготовки;

– точность принятых базовых поверхностей вращения;

– точность линейных технологических размеров;

– типы и классы точности используемых приспособлений.

В настоящее время синтез технологических баз для плоскостных элементов проводится технологом вручную, так как этот процесс до конца еще не исследован, а для элементов вращения – по разработанным формализованным правилам (9 правил) на основе конструктивно-

технологических характеристик (6 характеристик) этих элементов [7], при условии, что для плоскостных элементов базы уже назначены.



Рис. 1. Принципиальная схема САПР маршрутных ТП изготовления деталей типа тел вращения

Направление синтеза технологических баз – от последних операций ТП к первым, так как на последних операциях обрабатываются наиболее ответственные поверхности, как правило, связанные между собой требованиями взаимного расположения и конструкторскими линейными размерами. Такая направленность позволяет в конкретных ситуациях применять определенные критерии рациональности в зависимости от их приоритета и возможности их использования. В качестве таких критериев приняты [7]:

– минимизация погрешности базирования для плоскостных элементов и элементов вращения ($\Delta б \rightarrow \min$);

– минимизация количества технологических баз по всему ТП ($\{ТБi\} \rightarrow \min$);

– минимизация колебания припусков ($\Delta Zi \rightarrow \min$; $\Delta Бij \rightarrow \min$).

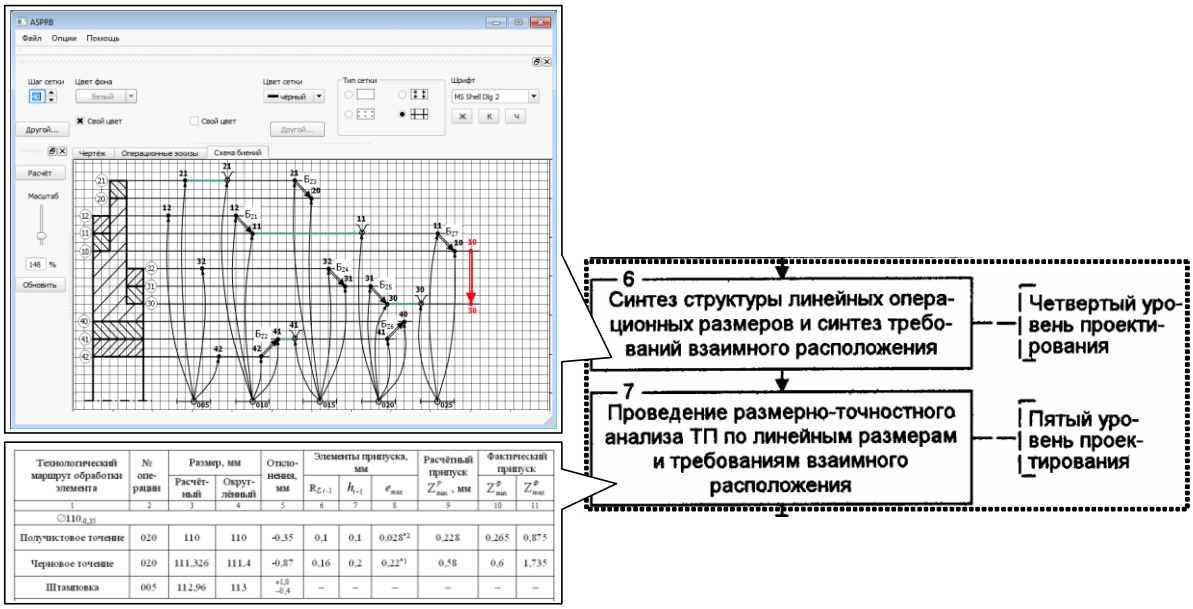
Корректировка точности поверхностей вращения, принятых в качестве баз, проводится ближе к (или до) среднеэкономической точности оборудования, на котором они формируются, согласно рекомендациям, представленным в [3, 8], если точность этих поверхностей, которая была определена для них на первом уровне проектирования, ниже рекомендуемой. Это необходимо, так как уменьшаются исходные биения обрабатываемых поверхностей и неравномерности припусков на их обработку, а в ряде случаев точность базовых поверхностей вращения напрямую сказывается на выполнении требований взаимного расположения поверхностей, заданных конструктором. Однако повышение точности этих поверхностей не должно увеличивать стоимость операций, на которых они формируются.

Определение необходимых типов и классов точности приспособлений для операций окончательной обработки заготовки, где выдерживаются заданные конструктором требования взаимного расположения между обработанными поверхностями, целесообразно проводить исходя из величины этих требований, используя соотношения, полученные на основе аналитических исследований для различных схем обеспечения ТВР поверхностей при их окончательной обработке [3, 8]. Для операций предварительной обработки заготовки класс точности приспособлений целесообразно определять исходя из точности базовых поверхностей, используя рекомендации, представленные в [3, 8].

Важными и ответственными этапами ручного, а тем более автоматизированного проектирования технологических процессов является синтез размерных схем и размерно-точностной анализ маршрутных ТП (в нашем случае четвертый и пятый уровни проектирования маршрутного ТП, см. рис. 2), что позволяет оценить надежность проектируемых ТП по параметрам точности и управлять качеством изготовления изделий уже на стадии проектирования ТП.

Особенно это актуально в условиях автоматизированного производства при использовании станков с ЧПУ, автоматов, полуавтоматов и агрегатных станков. Кроме того, это очень трудоемкий процесс, в частности в условиях среднесерийного и мелкосерийного многономенклатурного производств.

От того на сколько он тщательно проведен во многом зависит качество проектирования ТП и снижение сроков внедрения в производство спроектированных технологий. При этом значительно снижаются материальные затраты, связанные с необходимостью проведения отработки ТП по опытным и установочным партиям заготовок, а само внедрение ТП будет связано с отработкой и уточнением режимов резания при изготовлении одной-двух деталей из партии с последующим изготовлением всех деталей партии без брака.



Технологический маршрут обработки элемента	№ операции	Размер, мм		Отклонения, мм	Элементы припуска, мкм			Расчётный припуск	Фактический припуск	
		Расчётный	Округлённый		$R_{z\,i-1}$	h_{i-1}	$e_{i\,max}$	$2Z^{p}_{i\,min}$, мм	$2Z^{\phi}_{i\,min}$	$2Z^{\phi}_{i\,max}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\varnothing 110_{0,35}$										
Получистовое точение	020	110	110	-0,35	0,1	0,1	0,028*2	0,228	0,265	0,875
Черновое точение	020	111,326	111,4	-0,87	0,16	0,2	0,22*1	0,58	0,6	1,735
Штамповка	005	112,96	113	+1,0 -0,4	–	–	–	–	–	–

Рис. 2. Уровни автоматизированного проектирования маршрутного ТП, позволяющие провести оценку его надежности по параметрам точности

Целями размерно-точностного анализа маршрутных ТП являются:

1. Расчет (определение) всех операционных размеров и припусков на обработку;

2. Анализ возможности выполнения конструкторских размеров и технических требований взаимного расположения элементов с заданной точностью на выбранном оборудовании автоматически при установке заготовки без выверки или с применением выверки.

Проведение размерно-точностного анализа ТП неразрывно связано с синтезом соответствующих размерных схем. Для деталей типа тел вращения необходимо разрабатывать схемы линейных размеров и схемы биений.

Схема линейных размеров используется для анализа возможности обеспечения точности конструкторских размеров, расчета линейных операционных размеров и припусков на обработку. При этом обеспечиваются следующие критерии рациональности:

– полная взаимозаменяемость между конструкторскими и технологическими размерами, исключающая появление брака;

– наименьшее ужесточение допусков технологических размеров;

– минимальное колебание величин припусков в партии заготовок.

Для обеспечения надежности ТП по параметрам точности и выполнения указанных критериев рациональности синтез структур операционных размеров обеспечивает следующий рациональный состав технологических размерных цепей: не более трех составляющих звеньев в размерной цепи, замыкающим звеном которой служит конструкторский

размер; не более четырех составляющих звеньев в размерной цепи, замыкающим звеном которой служит припуск.

Схема биений, возникающих в ходе всего технологического процесса, используется для проверки возможности выполнения технических ТВР элементов вращения, определения неравномерности припусков, расчета диаметральных операционных размеров и припусков на обработку.

Структура технологических ТВР поверхностей вращения реализуется схемой биений элементов вращения в исходной заготовке, базовых, обрабатываемых и обработанных элементов вращения относительно идеальной поверхности, представляемой в исходной заготовке или образуемой вокруг оси шпинделя станка [3]. Схема биений представляется массивом чисел, который формируется автоматически по специальному алгоритму. Формализованная методика синтеза ТВР описана в [5]. Одной из особенностей этой методики является учет остаточных биений, так как именно они оказывают непосредственное влияние на выполнение технических требований, особенно для деталей приборостроения, в которых технические требования значительно «жестче» по сравнению с деталями машиностроения.

Анализ возможности получения заданной точности конструкторских линейных размеров проводится по формализованной методике [11]. Она включает формализованные правила назначения точности операционных размеров в зависимости от точности конструкторских размеров, числа составляющих размеров в линейных размерных цепях и интервалов размеров, в которые попадают конструкторские и технологические размеры. Методика разработана с использованием метода полной взаимозаменяемости и критерия – точность операционных размеров должна быть равна или не более чем на два квалитета грубее метода обработки или применяемого оборудования.

Методом расчета технологических размерных цепей принят метод максимума-минимума. В качестве замыкающих звеньев приняты конструкторские размеры и припуски, в качестве составляющих – технологические размеры [11].

Биения поверхностей вращения, получаемых в исходной заготовке, определяются с учетом короблений этих поверхностей и смещений их осей от номинального положения, а для отверстий, получаемых литьем, учитывают также перекос их осей [5]. Биения базовых поверхностей определяются по эмпирическим формулам [4], особенности применения которых приведены в [8]. Биения обрабатываемых поверхностей определяются путем автоматического составления размерных цепей биений, замыкающими звеньями которых являются искомые биения, а составляющими – биения базовых и обработанных к этому времени поверхностей, а также поверхностей в исходной заготовке. Расчет этих цепей биений проводится с учетом векторных свойств составляющих

звеньев по методу квадратичного суммирования [5]. Биения обработанных поверхностей определяются с помощью коэффициентов уточнения, указанных в справочной литературе [1].

После того, как установлена возможность обеспечения ТВР, заданных конструктором, по формализованной методике, представленной в [6], проводится расчет промежуточных припусков и диаметров элементов вращения на основе определения минимального расчетного припуска, величина которого должна обеспечить нормальный процесс резания. Его величина определяется суммой трех компонент: высотой микронеровностей и глубиной дефектного слоя, полученных после предыдущей обработки поверхности, а также суммарным значением пространственных отклонений e_{max}, возникающих на рассматриваемой и предыдущих операциях и включающих неконтролируемые погрешности формы, то есть неравномерностью припуска. Так как вектора биений одной и той же поверхности вращения в разных состояниях совпадают по направлению, то величину e_{max} определяют как половину арифметической разности между значениями биений обрабатываемого и обработанного элементов вращения. Расчет промежуточных диаметров проводится с выделением в необходимых случаях «чистовой» зоны обработки для того, чтобы учесть причины приводящие к появлению напуска. Эти причины самые различные: наличие уклонов в заготовке, полученной поковкой, штамповкой или литьем; отсутствие явновыраженного предварительного состояния элемента вращения; объединение в одной операции черновой и получистовой обработок; наличие значительной межоперационной неравномерности припуска, которая может превысить величину припуска, допустимую для получения заданного качества поверхности при её однократной обработке. Для этих случаев расчет e_{max} ведется с использованием коэффициента уточнения [1]. Зная величину диаметра рассматриваемой ступени обработки (D_i), величину минимального расчетного припуска ($z_{i\ min}$), удаляемого при получении D_i, а также величину отклонения диаметра предыдущей ступени обработки ($ei_{(i-1)}$ – для вала, $ES_{(i-1)}$ – для отверстия), определяется величина номинального диаметра предыдущей ступени обработки ($D_{(i-1)}$) по одной из формул:

$D_{(i-1)} = D_i + 2\ z_{i\ min} + |ei_{(i-1)}|$ – для вала;

$D_{(i-1)} = D_i - 2\ z_{i\ min} - ES_{(i-1)}$ – для отверстия.

После определения номинальных диаметров промежуточных ступеней обработки для каждого элемента вращения автоматически рассчитываются фактические значения минимальных и максимальных припусков на обработку.

В настоящее время на производстве этим этапам проектирования уделяется недостаточное внимание из-за их трудоемкости, нехватки у

технологов на это времени и по сути отсутствия у них необходимого программного инструментария.

Поэтому решение проблемы автоматизации синтеза размерных схем ТП и его последующего размерно-точностного анализа было и остается весьма актуальной задачей. Таким образом, для сокращения времени автоматизированного проектирования технологий, обеспечивающих надежность обработки по параметрам точности, технологам необходимо использовать соответствующие инструментальные средства – программные системы.

Примером такого инструментального средства является система «ТИС-Цепь» (НИУ ИТМО), позволяющая составить линейные размерные цепи, рассчитать их и вывести схему размеров для просмотра на экране ПК.

Однако для проверки возможности выполнения ТВР и определения неравномерности припусков технологи в настоящее время не обладают соответствующим инструментарием и делают это вручную. Поэтому в настоящее время ведутся работы по созданию системы интерактивного синтеза и расчета биений [10], в основу которой положена разработанная в СЗТУ и описанная в [3] методика синтеза размерных схем и размерно-точностного анализа ТП.

Такая система позволяет повысить качество технологической подготовки производства и проектировать технологии изготовления деталей типа тел вращения, обеспечивающие заданную точность конструкторских размеров и ТВР с определенным запасом, что гарантирует их надежность по параметрам точности, а также снизить затраты на их отработку и внедрение в производство по опытным и установочным партиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 912 с.
2. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник для вузов. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 512 с.
3. Основы технологии машиностроения: Учеб. пособие / А. Е. Вороненко [и др.]. – СПб.: СЗТУ, 2010. – 210 с.
4. Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.
5. Бородянский В.И., Муцянко В.И., Помпеев К.П. Технологические основы автоматизации синтеза требований взаимного расположения элементов обрабатываемой детали в САПР ТП // Библиотечный

указатель ВИНИТИ. Депонированные научные работы. – 1991. – № 2. – с. 64.
6. Помпеев К.П. Формализация анализа возможности выполнения технических требований чертежа и расчета диаметральных размеров // Машиностроение и автоматизация производства: межвуз. сб. – СПб: СЗПИ, 1993. – С. 25-30.
7. Бородянский В.И., Помпеев К.П. Технологические основы формализации процесса базирования деталей класса тела вращения // Машиностроение и автоматизация производства: межвуз. сб., вып. 1. – СПб: СЗПИ, 1996. – С. 3-20.
8. Помпеев К.П., Одинцова Л.В. Выбор приспособлений при автоматизированном проектировании надежных технологий // Инструмент и технологии. – 2004. – № 17-18. – С. 187-192.
9. Клевцов В.А., Одинцова Л.В., Помпеев К.П. Системный анализ при проектировании технологических объектов и процессов // Труды XI Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления». – Ч.I. – СПб: СЗТУ, 2010. – С. 193-197.
10. Помпеев К.П., Лазарев Э.Е., Пинаев Д.С. Интерактивный синтез и расчет биений // Труды десятой сессии Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», посвященной памяти В.П. Булатова, VPB – 11. – СПб.: ИПМаш РАН, 2011. – С. 334-340.
11. САПР изделий и технологических процессов в машиностроении / Р.А. Аллик, [и др.]; под общ. ред. Р.А. Аллика. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 319 с.

УДК 004.415.28

Н.Е. Филюков

МОДУЛЬ АДМИНИСТРИРОВАНИЯ ВЕБ-ЦЕНТРИЧНОЙ АСТПП



Николай Евгеньевич Филюков, аспирант
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (904)337-4030, E-mail: badfilin@gmail.com

Аннотация

В данном докладе рассмотрена работа с административной частью веб-центричной АСТПП – административным модулем. Показаны основные возможности модуля. Также рассмотрена структура модуля и примеры работы в нем.

Ключевые слова: АСТПП, распределенная система, веб-сервисы, подсистемы, агенты, администрирование, административный модуль

N. E. Filyukov

ADMINISTRATION MODULE OF WEB CENTRIC CAM SYSTEM.

Nikolay Filyukov, e-mail: badfilin@gmail.com
St.Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics, Russia

Abstract

The article is devoted work with administration part of web centric CAM system – administration module. The article is viewed the basic features of the module. Also examined the structure of the module and examples of work in it.

Key words: CAD, CAM, modules, agents, administration, administration module

В современном производстве предъявляются все более строгие требования к обеспечению выпуска высококачественной продукции, отвечающей современному уровню развития науки и техники. Этот уровень характеризует: усложнение конструкции изделий, повышение точности и качества их изготовления; снижение трудоемкости, себестоимости, увеличение

долговечности и надежности и т.п. В связи с чем предъявляются все большие требования к автоматизации ТПП.

Анализ проблем автоматизации ТПП показывает, что для современных систем АСТПП характерно следующее:

1. в АСТПП используются как универсальные (CAD/CAE/CAM/CAPP – системы), так и специализированные комплексы, направленные на решение узких технологических задач;
2. в АСТПП начинают использовать PDM для поддержки жизненного цикла изделии и организации единого информационного пространства;
3. наблюдается тенденция к виртуализации ТПП на основе аутсорсинга, что особенно важно в условиях виртуализации самого производства изделий,
4. подсистемы АСТПП имеют разный уровень автоматизации и слабо интегрированы как между собой, так и с ERP – системами.

В современных системах АСТПП должны использоваться как универсальные, так и специализированные подсистемы ТПП. Они должны интегрироваться между собой в единую систему. Сложность создания специализированных подсистем ТПП заключается, главным образом, в необходимости учета специфики предприятия и высокой динамики развития.

Таким образом, АСТПП представляет собой сложную и неоднородную информационную систему и для повышения эффективности технологической подготовки производства необходимо построить методологическую основу для создания АСТПП, отвечающей современным и весьма сложным требованиям, чтобы впоследствии такую систему можно было использовать в различных производственных средах и при любых уровнях кооперации предприятий.

Существуют различные формы кооперации, такие как кластеры, расширенные и виртуальные предприятия (ВП). С точки зрения методики организации взаимодействия на уровне совместного использования информации о продукте принципиальных отличий между описанными выше видами кооперацией нет, поэтому в дальнейшем будем рассматривать данные понятия как синонимы.

Создание ВП сегодня рассматривается как один из путей оптимизации промышленного производства. Это рассмотрение приводит к определенной системе взглядов на то, как обычное предприятие должно использовать свои возможности.

Технологическая подготовка производства в ВП подразумевает виртуализацию производства. Производственные мощности кооперации предприятий объединяются в единое производство при этом организациям не нужно предоставлять полные данные о своём оборудовании, в их задачи входит в рамках единого информационного пространства предоставить свои производственные возможности, а именно, что и как они могут изготавливать. Единое информационное пространство формируется по средст-

вам PDM-системы, к которой должен быть возможен доступ всех участников кооперации.

Большинство современных систем АСТПП разработаны как клиентские приложения. Их использование с установкой на разных предприятиях может быть нецелесообразно, так как базы данных и базы знаний постоянно пополняются, и может происходить довольно быстрое устаревание данных в таких системах. Поэтому целесообразно использовать общую систему АСТПП, работающую по средствам веб-технологий, что даст следующие преимущества:

1. Единая база данных и база знаний технологических заданий.
2. Единая система взаимодействия с PDM-системой.
3. Обновление системы доступно сразу и для всех предприятий.
4. Интеллектуальные подсистемы обучаются быстрее, так как их использует множество предприятий (кооперaций). Возрастает автоматизация системы при проектировании технологических процессов.
5. Система доступна из сети (интернет), что дает использовать АСТПП, когда это необходимо без установки программного обеспечения на ЭВМ пользователя.

Принимая во внимание всё выше сказанное, АСТПП представляет собой сложную и неоднородную информационную систему и для повышения эффективности технологической подготовки производства необходимо построить методологическую основу для создания АСТПП, отвечающей современным и весьма сложным требованиям.

Использование мультиагентных технологий позволяет повысить уровень интеллектуальности АСТПП, при этом агенты хотя, и не зависимы друг от друга, но имеют возможность взаимодействовать между собой, и предлагать технологу варианты решения технологических задач.

Компоненты программы могут быть распределены по разным узлам сети, и предлагаются как независимые, слабо связанные, заменяемые сервисы-приложения. Программные комплексы, разработанные в соответствии с SOA, часто реализуются как набор веб-сервисов, интегрированных при помощи известных стандартных протоколов (SOAP, WSDL, и т. п.).

Использование мультиагентных технологий, дает нам возможность разделить АСТПП на интеллектуальные агенты, где каждый агент выполняет свою конкретную задачу, не зависящую друг от друга, но взаимодействующие друг с другом.

Одним из важнейших составлющих распределенной АСТПП, разрабатываемой на кафедре ТПС является модуль администрирования. Данный модуль представляет собой центральную (серверную) часть для организации взаимодействия пользователей, подсистем и агентов системы.

На рис. 1 изображена архитектура распределенной АСТПП, разрабатываемой на кафедре ТПС СПб НИУ ИТМО. Модуль администрирования представляет собой части 1, 2, 3, 4 и 6.

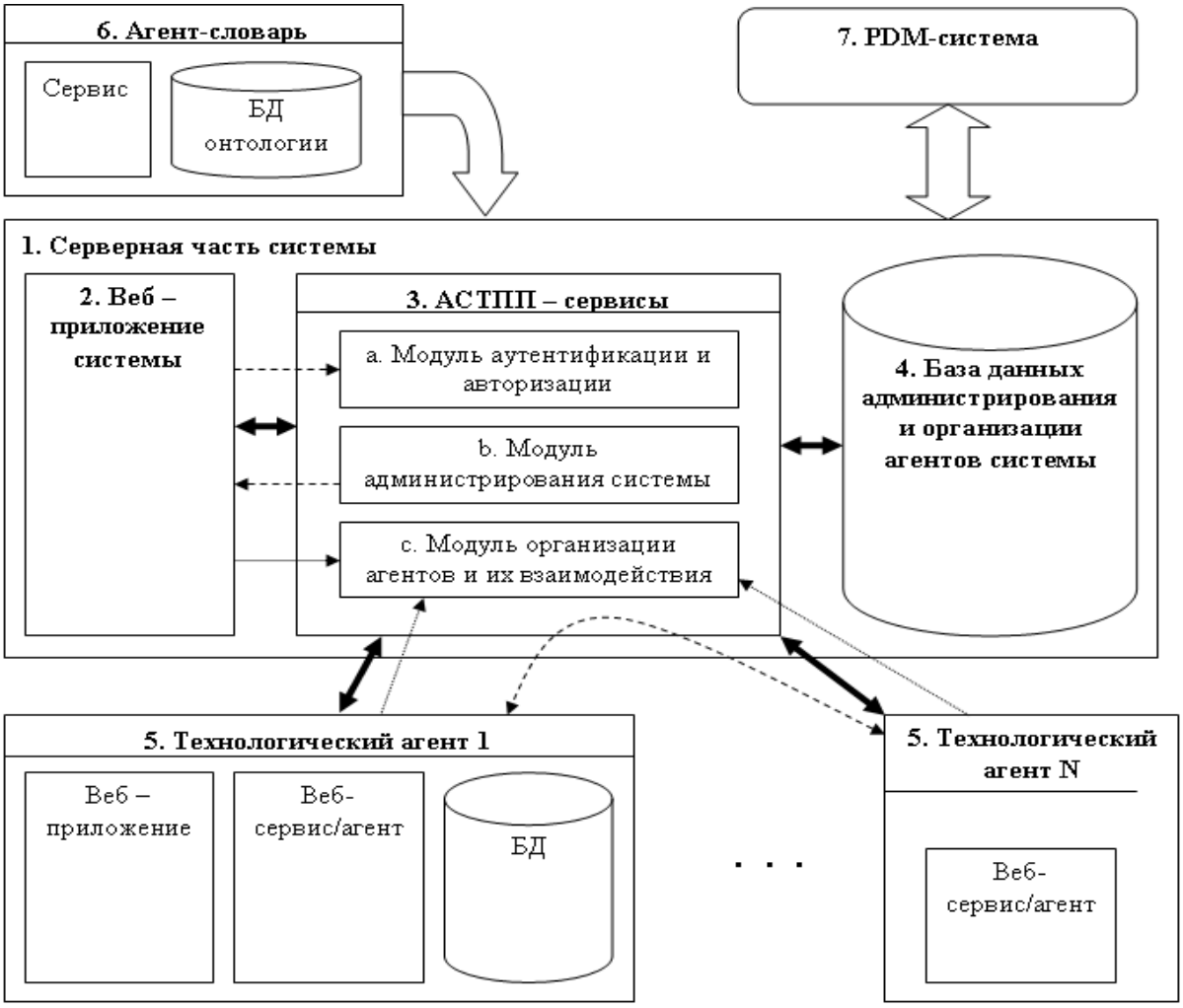


Рис. 1. Архитектура технологической интегрированной среды

Основой модуля администрирования являются АСТПП – сервисы, которые обеспечивают работу системы. Как видно из рисунка, сервисы поделены на три части:

- Модуль аутентификации и авторизации предоставляет методы и средства для идентификации пользователя вошедшего в систему. После аутентификации пользователь получает права, дающие ему возможность для работы с самим модулем администрирования, а также с подключенными к АСТПП модулями и подсистемами.
- Модуль администрирования системы – предоставляет методы для администрирования системой. Через данный модуль администраторы могут распределять права доступа, при необходимости создавать новые роли пользователей, управлять технологическими подсистемами и др.
- Модуль организации агентов и их взаимодействия – осуществляет идентификацию программных агентов и их взаимодействие между собой. Тем самым агенты взаимодействия между собой могут выдавать технологу различную информацию для работы.

Веб-приложение системы представляет собой пользовательский интерфейс, при помощи которого пользователи проходят аутентификацию в системе, позволяет работать и администрировать систему.

База данных администрирования и организации агентов системы является хранилищем для данных и знаний, используемых самим модулем администрирования, а также предоставляет хранилище для данных подключаемых подсистем.

Агент-словарь представляет собой специальный обособленный модуль, в котором хранится технологический словарь терминов, способ представления и формирования специальных лингвистических запросов для взаимодействия агентов между собой.

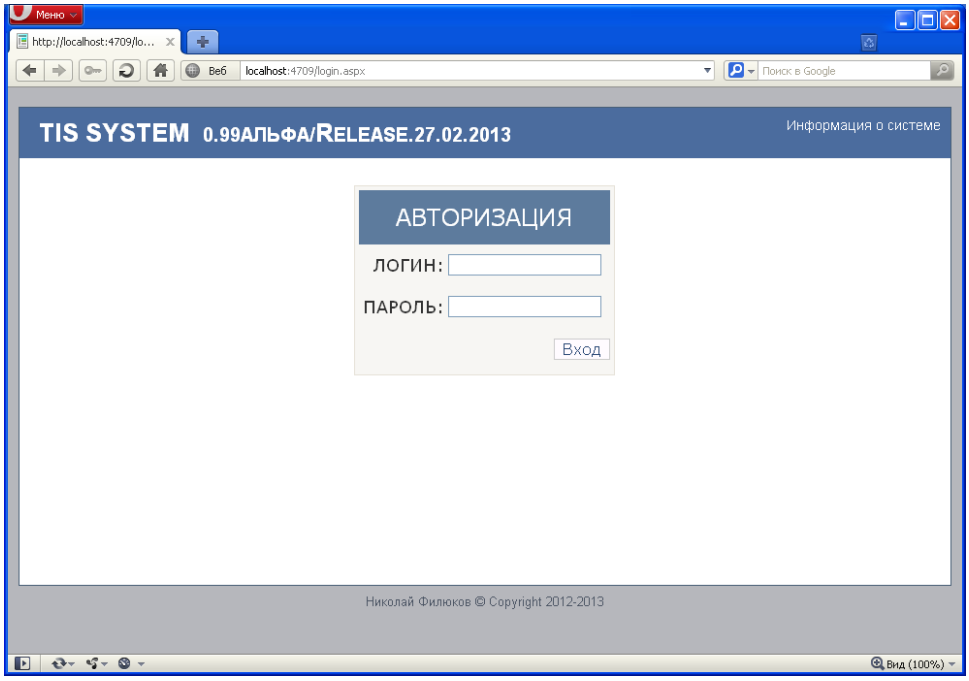


Рис. 2. Вход в систему ТИС

В модуле администрирования возможно разностороннее управление правами и действиями пользователей, работающих в нем. Так как система АСТПП ТИС разрабатывается для работы в рамках виртуального предприятия система, она позволяет распределять пользователей по организациям, которые работают в рамках нее.

Центральная по уровню иерархии в системе является роль администратора системы (АС, Main administrator – см. рис. 3). АС имеет стандартные права, дающие ему возможность добавлять к системе новые организации, добавлять модули, агенты, подсистемы к системе, а также распределять доступ к ним других пользователей, создавать новые роли с различными правами в рамках системы (системного предприятия) и др. возможности.

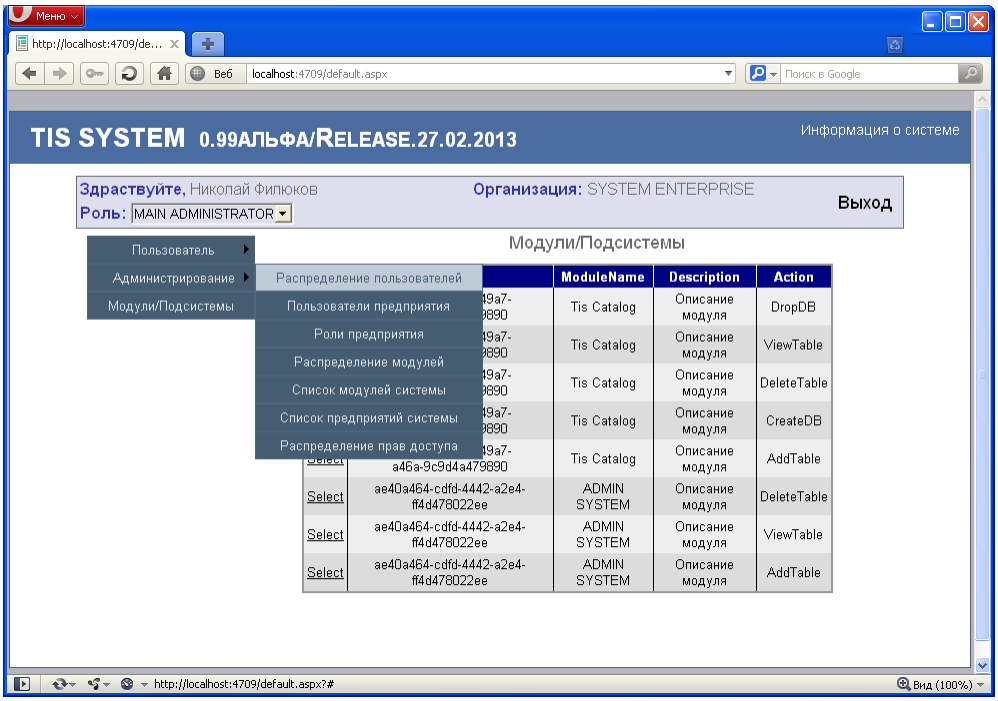


Рис. 3. Интерфейс администрирования системой

После добавления к системе организации или предприятия автоматически создается роль – администратор предприятия (АП). АП позволяет производить администрирование внутри вновь добавленного предприятия или организации в рамках системы. АС и АП могут создавать сколько угодно дополнительных ролей с различными вариантами прав доступа.

Модуль помимо доступа к подсистемам позволяет давать права на работу с базами данных и знаний этих систем. Такие роли обычно называются администраторы баз данных.

Пользователи по средствам модуля администрирования могут производить переход к подсистемам, если у них есть права доступа к нему.

Модуль администрирования также позволяет организовывать взаимодействие агентов, выполняющий технологические функции между собой. За данную возможность отвечает специальный веб-сервис, который предоставляет необходимые классы, структуры и методы для взаимодействия агентов. Для того чтобы агенты могли понимать друг друга, принимать и отдавать информацию в корректном виде, для формирования запросов используется лингвистический агент, с помощью которого разработчик строит запрос для получения данных, которые ему необходимы.

Агенты посылают специальный запрос к веб-сервису модуля администрирования, после чего по нему в каталоге агентов на сервере производится поиск агента, обладающего необходимыми данными или знаниями. Если таковой агент был найден, агенту пославшему запрос высылается адрес найденного агента для последующего взаимодействия с ним по специальным алгоритмам.

Таким образом, модуль администрирования формирует «мир знаний» для агентов. Агентами в системе являются малые подсистемы, которые могут использовать большие подсистемы, типа «системы формирования технологических процессов», «системы расчетов режимов резанья», «системы выбора оснастки» и других, где агенты могут предоставлять различные данные из своих баз данных, таких как информация об оборудовании, технологический классификатор и другие.

Для обеспечения безопасности системы и ее отказоустойчивости предполагается иметь параллельно копию системы, в базу данной которой постоянно сохранялась резервная копия основной административной системы. Такая резервная программа активизировалась при сбое в работе основной системы и подсистемы, и агенты обращались бы к ней для работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.А. Саломатина. Алгоритмы функционирования технологической подготовки производства в информационной среде виртуального предприятия. Дисс. на соискание ученой степени к. т. н., СПб., 2011. – 149 стр.
2. В. Романченко. Облачные вычисления на каждый день [Электронный ресурс]. 2009. URL: http://www.3dnews/editorial/cloud_computing (дата обращения: 25.03.2013).
3. Технология создания многоагентных прикладных систем / Г.Б. Евгенев // Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-08, Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2008.
4. Технологическая подготовка производства – как веб–центричная система / Е. И. Яблочников, Д. Д. Куликов // СПб НИУ ИТМО, Россия, 5 с.
5. Методы управления жизненным циклом приборов и систем в расширенных предприятиях. Учебное пособие / Е.И. Яблочников, В.И. Молочник, Ю.Н. Фомина, А.А. Саломатина, В.С. Гусельников – СПб, 2009, 149 с.
6. Е.В. Симонова. Мультиагентные технологии – перспектива развития современных программных комплексов. Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева (СГАУ), г. Самара
7. Многоагентные системы в САПР (Часть 2) /С.А. Жмурко // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы, 2007, №2(30) I Секция «Интеллектуальные системы» Таганрогский технологический институт Южного федерального университета
8. Г.И. Радченко. Распределенные вычислительные системы. – Челябинск, Фотохудожник, 2012. – 184 с. ISBN 978-5-89879-198-8
9. ГОСТ Р 50-54-86-88. Автоматизированная система технологической подготовки производства. Состав и порядок разработки. Рекомендации. / ВНИИНМАШ, 1988
10. Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA). URL: http://www.fipa.org (дата обращения: 25.03.2013)

МЕХАНИКА МАШИН

666.1.4:681.7.068.4

Л.Б. Алексеева, В.П.Уваров

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ВЯЗКОУПРУГУЮ СРЕДУ, ПРИ УПРАВЛЯЕМОМ ДВИЖЕНИИ



Любовь Борисовна Алексеева, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный Горный университет, Васильевский остров, 21 линия, д.2, Санкт-Петербург,199106, Россия. Тел.8 (921) 357-81-74, E-mail: lbalek@rambler.ru



Виктор Павлович Уваров, д.т.н. профессор
Санкт-Петербургский государственный Горный университет, Васильевский остров, 21 линия, д.2, Санкт-Петербург,199106, Россия. Тел.8 (921) 975-68-99, E-mail:uvpav@rambler.ru

Аннотация

Технологический процесс вытяжки стеклянных стержней из разогретой стекломассы рассматривается как объект управления. Исследованы переходные процессы в системе «зона формирования стержня – установка вытяжки». Выделены параметры, от соотношения которых зависит характер переходных процессов в целом. Это позволяет выбрать метод управления и определить время переходных процессов.

Ключевые слова: объект управления, стекломасса, математическая модель, устойчивость движения, установившийся режим, переходные процессы, зона формирования, отклик, возмущение, процесс вытяжки.

L.B.Alexeeva, V.P.Uvarov

DYNAMIC PROPERTIES OF A CONTROL OBJECT CONTAINING VISCOELASTIC MEDIUM WITH CONTROLLED MOTION

Lyubov B. Alexeeva[1], e-mail: lbalek@rambler.ru;
Victor P. Uvarov[1], e-mail:uvpav@rambler.ru.
[1]National Mineral Resources University "Mining University", Russia

Abstract

Processing the draw-forming of glass rods from vitreous melt is considered as control object. Transient phenomena are investigated in the rod-forming zone /drawing arrangement system. Parameters whose correlation characterizes

transient phenomena types in general are identified. This enables us to choose the control method and time the transient phenomena.

Key words: control object, glass mass, mathematical model, stability of motion, steady-state regime, transient processes, forming zone, response, perturbation, drawing process

Объект управления – технологический процесс вытяжки стеклянных стержней из размягченной стекломассы. Это могут трубки, тонкие штабики с диаметром поперечного сечения 0,5…2мм. При их изготовлении применяется метод вытягивания размягченной стекломассы через фильеру или метод перетягивания из заготовки, конец которой размягчен в печи нагрева.

В работах [1], [2] рассматривалось установившееся движение, определялись статические свойства объекта управления и оценивалась чувствительность зоны формирования к отклонениям основных технологических параметров. Это позволяет определить точность поддержания этих параметров на заданном уровне и пронормировать уровень помех, исходя из требований к качеству вытягиваемых световодов.

Однако возникает задача не только контроля основных параметров процесса, но и управления им. При использовании любого принципа управления (принципа совмещения функций контроля и управления, принципа адаптации) необходимо определение динамических свойств объекта управления. Эти свойства определяются зависимостью выходной величины от входной в переходных режимах.

При этом возникает большое количество схем в зависимости от выбора контролируемых параметров (выходные величины) и управляющих воздействий (входные величины).

Для рассматриваемого процесса чаще всего используют две схемы:

1) контроль диаметра световода – управление скоростью вытяжки;

2) контроль усилия вытяжки – управление скоростью вытяжки.

При использовании любой схемы необходимо определение динамических свойств системы управления, включающей объект управления (зона формирования) и регулирующий орган (управляющее устройство – установка вытяжки) [3].

Динамическая модель установки вытяжки включает в себя электродвигатель, соединенный с механизмом вытяжки, имеющий одну степень свободы. Звенья механизма вытяжки считаются абсолютно твердыми, зазоры в кинематических парах не учитываются. Все силы и массы приведены к выходному звену механизма вытяжки (звездочка цепной передачи, шкив ременной передачи, фрикционный каток и т.п.). При указанных условиях математическая модель устройства вытяжки состоит из двух уравнений – уравнения движения механизма вытяжки и

уравнения динамической характеристики двигателя, зависящей от его статической характеристики и постоянной времени.

Обычно в электрических приводах устройств вытяжки используют электродвигатели постоянного тока. У таких двигателей статическая характеристика линейна и представляет собой семейство параллельных прямых. В общем случае, если статические характеристики нелинейны, то они линеаризуются в окрестностях заданной скорости двигателя.

Характер переходных режимов в установке вытяжки зависит от соотношения $\varsigma = 0{,}5\sqrt{\tau_м/\tau_д}$, где $\tau_м$ – постоянная времени механизма вытяжки, $\tau_м = I/k$; I – приведенный момент инерции механизма вытяжки; k – крутизна статической характеристики двигателя; $\tau_д$ – постоянная времени двигателя.

Для $\varsigma > 1$ (инерционная установка вытяжки) переходный процесс определяется выражением

$$\omega = \omega_2 + A_1 \exp(\lambda_1 \psi) + A_2 \exp(\lambda_2 \psi),$$

где $\lambda_{1,2} = -\varsigma \pm \sqrt{\varsigma^2 - 1}$; A_1, A_2 – постоянные, зависящие от начальных условий; $\psi = t/\sqrt{\tau_м/\tau_д}$; ω – угловая скорость звена приведения

Пусть при $\psi = 0$ $\omega = \omega_1$; $M_д = M_0^* - k(\omega_1 - \omega_2)$, где M_0^* – пусковой момент, соответствующий скорости ω_2 выходного звена механизма вытяжки, на которую перестраивается установка вытяжки после подачи управляющего сигнала на двигатель.

Тогда

$$A_1 = \frac{\Delta\omega}{2\varsigma} \cdot \frac{2\varsigma\,\lambda_2 + 1}{\lambda_1 - \lambda_2}; \quad A_2 = \frac{\Delta\omega}{2\varsigma} \cdot \frac{2\varsigma\,\lambda_1 + 1}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

где $\Delta = \omega_2 - \omega_1$ – диапазон регулирования скорости ω.

Если $\varsigma < 1$ (малоинерционная установка вытяжки), то

$$\omega = \omega_2 + A_3 \exp(-\varsigma\psi) \cos\left(\sqrt{1-\varsigma^2}\,\psi + \alpha\right),$$

где A_3, α – постоянные, определяемые начальными условиями.

Переходные процессы в установке вытяжки создают возмущающую силу, действующую на зону формирования стержня. Характер изменения этой силы соответствует характеру изменения скорости вытягивания стержня (угловой скорости звена приведения)

$$F(t) = \Delta F\,\Omega,$$

где $\Delta F = F_2 - F_1$; F_1, F_2 – величины сил вытягивания стержня, соответствующие скоростям ω_1, ω_2; $\Omega = \Delta/\Delta_\omega$; $\Delta_\omega = \omega - \omega_1$

Воздействие силы $F(t)$ вызывает изменение геометрии поперечного сечения вытягиваемого световода и длины L зоны формирования.

Поэтому переходный процесс, связанный с воздействием на зону формирования силы $F(t)$, определяется по изменению длины L зоны формирования; $L - L_0 = z(t)$, где L_0 – исходная длина зоны формирования.

Для воздействия произвольного вида, прикладываемого в момент времени $t = 0$ к покоящейся системе, переходный процесс может быть определен на основе интеграла Дюамеля – Карсона

$$z(t) = \int_0^t F(\tau)\, h(t-\tau)\, d\tau\,, \qquad (1)$$

где τ – вспомогательное время интегрирования, изменяющееся в пределах от нуля до рассматриваемого текущего времени t; $h(t-\tau)$ – реакция стекломассы в момент t на единичный импульс.

Для вычисления реакции системы на единичный импульс используется линейное дифференциальное уравнение

$$m\,\frac{d^2 z}{dt^2} + \eta\,\frac{d\,z}{d\,t} + c\,z = 0\,,$$

где m – количество стекломассы в зоне формирования; η, c – коэффициенты соответственно демпфирования и упругости стекломассы

Начальные условия: $t = 0;\ z = 0;\ m\,\frac{d\,z}{d\,t} = 1$ Н с. При определении реакции стекломассы использовано понятие критического коэффициента демпфирования, равного $\eta_{кр} = 2m\sqrt{c/m} = 4m\pi/T$, где $T = 2\pi\sqrt{m/c}$.

При $n = \eta/\eta_{кр} < 1$ стекломасса в зоне формирования проявляет упругие свойства и ее поведение соответствует типовому колебательному звену

При $n > 1$ реакция стекломассы соответствует апериодическому звену.

Характер переходных процессов в системе «зона формирования световода – установка вытяжки» определяется с помощью интеграла (1), который зависит от следующих величин: ς, n, $\tau_м/T$. Например, при $\varsigma > 1$, $n > 1$, приведя решение к безразмерному виду, получим

$$\bar{z}(\psi) = 1 + D_1 \exp(\lambda_1\psi) + D_2 \exp(\lambda_2\psi) + D_3 \exp(q_1\psi) + D_4 \exp(q_2\psi),$$

где $\bar{z}(\psi) = \frac{z(t)\gamma_1}{\Delta F\, B_1}\ \frac{n+\sqrt{n^2+1}}{2\sqrt{n^2-1}}$; $D_1 \ldots D_4$ – постоянные, зависящие от начальных условий; $q_{1,2} = \frac{\pi}{\varsigma}\ \frac{\tau_м}{T}\left(-n \pm \sqrt{n^2-1}\right)$.

Получены выражения, определяющие характер переходных

процессов при различных сочетаниях ς, n. (Табл. 1). Подобного рода сведения формируют каталог «динамические звенья» библиотеки типовых звеньев

Таблица 1

Параметры системы	Характер переходных режимов	Примечания
$\varsigma > 1,\ n > 1$	Апериодический	
$\varsigma < 1,\ n > 1$	Апериодический или колебательный	Зависит от $\tau_м / T$
$\varsigma > 1,\ n < 1$	Апериодический	
$\varsigma < 1,\ n < 1$	Колебательный (с перерегулированием)	

Из сопоставления полученных результатов следует, что параметры установки вытяжки $(\varsigma >< 1)$ оказывают основное влияние на характер переходных процессов (апериодический или колебательный). Параметры зоны формирования и прежде всего отношение $\tau_м / T$ оказывают существенное влияние на время переходного процесса, которое определяет качество управления. Дан анализ влияния параметров n, ς на время переходного процесса. Показано, что при $\tau_м / T \to \infty$ время переходного процесса стабилизируется, стремясь к конечному пределу.

Характер переходного процесса позволяет выбрать способ управления. При апериодическом характере переходного процесса (без перерегулирования) следует использовать способ форсированного перехода от ω_1 к ω_2 . Если переходный процесс имеет колебательный характер (с перерегулированием), то для уменьшения времени переходного процесса можно ввести квазиоптимальное управление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева Л.Б., Ильичев В.А. Оценка статических свойств объекта управления, содержащего упруговязкую среду // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – №4. – С. 16-20.
2. Алексеева Л.Б., Ильичев В.А., Уваров В.П. Идентификация свойств объекта управления, содержащего упруговязкую среду//Известия вузов. Машиностроение. – 2008. – №5. – С. 28-32.
3. Алексеева Л.Б.,Уваров В.П. Оценка свойств объекта управления, содержащего упруговязкую среду, при управляемом и неуправляемом движении. // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 118-125.

УДК 621.01

П.А. Андриенко, Д.П. Козликин, А.В. Хисамов, И.О. Хлебосолов

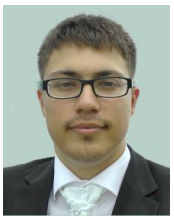
О ПРИМЕНЕНИИ БЕСКОНТАКТНЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СТЕНДАХ



Павел Александрович Андриенко – Санкт-Петербург, Россия, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, к.т.н., доцент кафедры «Теория механизмов и машин»
тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: andrienko-p@mail.ru



Денис Петрович Козликин – Санкт-Петербург, Россия, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, к.т.н., доцент кафедры «Теория механизмов и машин»
тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: tmm-russia@mail.ru



Андрей Владимирович Хисамов – Санкт-Петербург, Россия, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, магистр техники и технологии, аспирант кафедры «Теория механизмов и машин»
тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: andrey@k-digital.ru



Игорь Олегович Хлебосолов – Санкт-Петербург, Россия, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, к.т.н., доцент кафедры «Теория механизмов и машин»
тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: tmm-russia@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы бесконтактных высокоточных измерений геометрических параметров в центробежных стендах. Предложен метод статических измерений и оборудование, позволяющее получить их требуемую точность.

Ключевые слова: бесконтактные измерения, испытательное оборудование, центробежные стенды.

P.A. Andrienko, D.P. Kozlikin, A.V. Khisamov, I.O. Khlebosolov

ISSUE OF CONTACTLESS MEASURE SYSTEMS IN CENTRIFUGE STANDS

Dr. P.A. Andrienko[1], ass. prof. e-mail: andrienko-p@mail.ru
Dr. D.P. Kozlikin[1], ass. prof. e-mail: kodenis@rambler.ru
A.V. Khisamov[1], e-mail: andrey@k-digtial.ru
Dr. I.O. Khlebosolov[1], ass. prof., e-mail: tmm-russia@mail.ru
[1]St. Petersburg Polytechnical University, Polytechnicheskaya, 29, St-Petersburg, 195251, Russia Phone: +7(812)-297-4845

Abstract

The paper deals with issues of contactless precision measurement of centrifugal stands geometric parameters. The method of static measurements and equipment, allowing getting the required accuracy of them, are proposed.

Key words: contactless measurements, testing equipment, centrifugal stands.

Имитационное моделирование давно и прочно заняло место в научных исследованиях [1-8]. Достоинства этого метода исследования очевидны, к основным можно отнести возможность проведения натурных испытаний объектов в условиях, близких к реальным условиям нагружения.

Одним из характерных типов подобных испытаний является создание (имитация) различных перегрузок. В свою очередь, широкий класс среди них образуют постоянные линейные ускорения. Для воспроизведения постоянных линейных ускорений традиционно используются центрифуги. К достоинствам их применения можно отнести удачное соотношение габаритов установки и воспроизводимых с управляемой длительностью требуемых параметров. При этом величина воспроизводимого ускорения w определяется выражением

$$w=\omega^2 R,$$

где ω – угловая скорость вращения ротора центрифуги, R – расстояние (радиус) от оси вращения до контрольной точки объекта испытаний. Очевидно, что точность измерения ускорения характеризуется не только его погрешностью, но и погрешностью воспроизведения.

Итак, в процессе воспроизведения ускорения на центрифуге суммарная погрешность складывается из *погрешности воспроизведения* угловой скорости вращения и *погрешности размещения* объекта испытаний на заданном радиусе.

Погрешности воспроизведения и измерения тесно связаны друг с другом. Для поддержания требуемых параметров движения в машинах предусматриваются обратные связи. Но если в процессе движения радиус плеча центрифуги изменяется по случайному закону, из-за внутренних или внешних возмущений, то даже высокая точность измерения не позволит обеспечить движение с заданными параметрами – невозможно будет сформировать требуемое корректирующее воздействие. В свою очередь,

низкая точность измерения не позволит получить точных экспериментальных данных даже при неизменном радиусе.

На динамику привода и, соответственно, точность его работы оказывают влияние возможные пульсации двигателя, вызванные дискретностью обмоток, коммутацией; технические характеристики системы управления; характер изменения механических и аэродинамических моментов сопротивления движению ротора. Надо сказать, что эти факторы в основном определяют систематическую составляющую погрешности воспроизведения угловой скорости. Опыт использования определенных прецизионных систем управления позволяет рассчитывать на малые отклонения от значения установленной частоты вращения в рабочем диапазоне угловых скоростей. Измерение же этих скоростей осуществляется прецизионными интегрирующими системами путем сравнения воспроизводимой частоты с частотой кварцевого генератора. Точность этих измерений значительно превосходит точность воспроизведения ускорения. Очевидны и способы обеспечения требуемой точности воспроизведения: использование специального электродвигателя, стабильной электропитающей сети с качественным заземлением и создание определенной конструкции механической части, обеспечивающей постоянство моментов сопротивления при вращении во всем диапазоне угловых скоростей.

В свою очередь, погрешность размещения объекта испытаний на радиусе заданной величины зависит от механических свойств и геометрической конфигурации ротора и стола (это определяет деформации в статике и в процессе движения); от динамических свойств механической системы в целом, определяющих внутреннюю виброактивность; от аэродинамических свойств ротора-платформы; от скорости вращения, массы объекта и температуры среды, определяющих удлинение радиуса и другие деформации в процессе вращения. Эти факторы в той или иной степени должны учитываться при проектировании установки для того, чтобы была возможность осуществлять измерения с заданной погрешностью. Определенная расчетная жесткость металлоконструкции ротора позволит производить измерения в статическом и динамическом режимах.

В общем случае погрешность измерения радиуса до базовой поверхности стола зависит от погрешности определения расстояния от фактической оси вращения до базовой поверхности шпинделя; от погрешности измерения расстояния от базовой поверхности шпинделя до базовой поверхности стола. Таким образом, очевидно, что для определения погрешности измерения радиуса ключевым моментом является процедура определения положения оси вращения ротора-платформы.

Измерительная система современной прецизионной установки должна иметь погрешности определения абсолютных координат реперных точек не более 1 мкм на расстояниях порядка 3 м. Наиболее точная современная измерительная система, построенная на базе интерферометра и монохро-

матического лазера, по своим эксплуатационным характеристикам не может обеспечить требуемые точностные параметры. Это связано с тем, что ось вращения определяется опосредованно, через измерения траектории реперной точки. Однако, учитывая специфические особенности современных прецизионных установок, можно встроить в нее измерительную систему таким образом, чтобы получить наименьшие погрешности воспроизводимых ускорений.

Рассмотрим метод измерения радиуса с использованием специального оборудования, которое позволяет осуществить непосредственное измерение расстояния от оси вращения до базовой поверхности стола, но только в статическом режиме.

Для решения поставленной задачи требуется применение бесконтактного метода измерения. Одним из них является использование лазерного трекера, показанного на рис. 1, оснащенного интерферометром с погрешностью 0,5 мкм и следящей системой.



Рис. 1. API Tracker 3

Общие сведения:

Измерительная следящая система на базе лазерного трекера *API – Automated Precision Inc*. (США) – высокотехнологичный измерительный прибор, основанный на принципе слежения за специальным уголковым отражателем с помощью лазерного луча. Испускаемый прибором лазерный луч, попадая в центр триплпризменного уголкового отражателя, возвращается обратно в объектив прибора, а далее на приемный датчик дальномера. С учетом двух углов и расстояния вычисляются текущие пространственные координаты отражателя (например, *X, Y, Z*). Координаты можно получать как в статическом режиме, так и при перемещении измеряемого объекта. Схема измерительной системы показана на рис. 2.

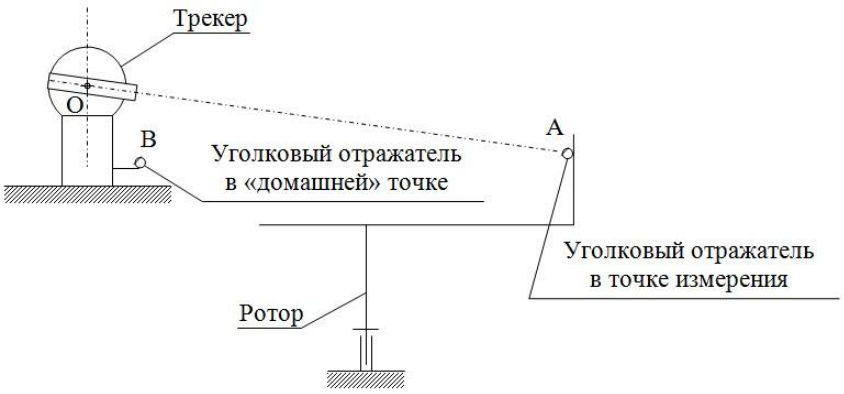


Рис. 2. Измерительная следящая система на базе лазерного трекера

Лазерный трекер *API Tracker*3 оснащен двумя типами дальномеров: интерферометром для определения изменения расстояния и абсолютным дальномером для измерения расстояния от прибора до отражателя. Абсолютный дальномер калибруется интерферометром. Главной особенностью трекера является размещение блока лазерного интерферометра и датчика слежения в одном устройстве прямо на валу прибора. В результате лазерный луч выходит из головки следящей системы, не преломляясь через зеркало. Это значительно снижает погрешности измерения.

Двигатели слежения трекера постоянно работают на скорости около 1200 об/мин. Несмотря на жесткость конструкции прибора и хорошую балансировку, это необходимо учитывать как источник вибрации.

Трекер оснащен всем необходимым программным обеспечением. Координаты центра отражателя и вычисляемых точек с погрешностями измерения отображаются на мониторе и сохраняются в виде файлов. Система автоматически производит горизонтирование. Для управления системой достаточно одного оператора.

Анализ возможностей системы измерений

Расчеты погрешностей измерения на прецизионной установке с учетом ошибок трекера показывают, что в идеальном случае радиус траектории реперной точки может быть определен с точностью не хуже 7 мкм, определяемой в основном погрешностью уголкового отражателя.

Координаты оси вращения могут быть определены с ошибкой – не хуже 2 мкм, а ее отклонение от вертикали – не хуже, чем 3”.

Отклонение плоскости стола от параллельности оси вращения и перпендикулярности радиусу может быть измерено с точностью не хуже 2”.

Отклонение от горизонтального положения верхней грани стола при его малом повороте вокруг радиуса – не хуже 3”.

Для повышения точности измерений следует учесть, что угловая ошибка на расстояниях порядка 0,3…1,5 м порождает гораздо большие погрешности, чем радиальная. Следовательно, для наиболее точного опреде-

ления радиуса траектории и положения в пространстве оси вращения центр трекера следует размещать как можно ближе к центру траектории. Из конструктивных особенностей центрифуги трекер удобно установить над ротором вблизи оси вращения в перевернутом виде и, вероятно, со снятой ручкой (см. рис. 3). Правильным было бы столы разместить по разные стороны от центра.

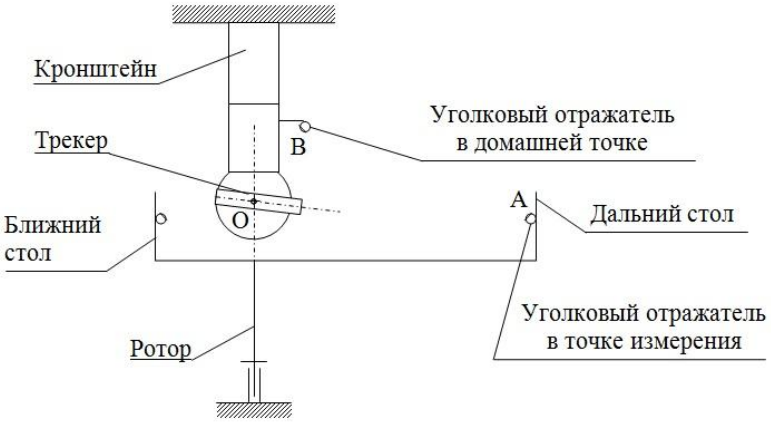


Рис. 3. Наиболее рациональное размещение трекера

Кронштейн с трекером, должен иметь низшую частоту свободных колебаний более 30 Гц, чтобы отстроиться от резонансов, возможных на 20 Гц.

Измерение радиуса траектории, координат центра и углов ее наклона

Для определения расположения оси ротора в системе координат трекера и радиуса окружности реперной точки стола все измерения должны выполняться в термостатическом режиме при отсутствии человека как источника тепла. После прогрева трекера и выполнения всех подготовительных операций (калибровка и др.) отражатель снимается с «домашней» точки (B) и аккуратно (скорость не более 3 м/с и ускорение не более 20 м/с^2) переносится в гнездо (A), установленное на столе. После термостабилизации снимается отсчет координат точки A в этом положении. Затем стол должен быть повернут приблизительно на 300, остановлен и после термостабилизации снова снимается отсчет координат точки A в новом положении. Уголковый отражатель не меняет своего положения на роторе, следовательно, если центр трекера близок к оси вращения ротора, то отражатель не отклоняется от трекера (см. рис. 3). Действуя далее аналогично, отсчеты снимаются каждые 30° на протяжении всего целого оборота ротора. При такой методике удается не применять встроенный дальномер с погрешностью 15 мкм, а измерять все расстояния только интерферометром с ошибкой 0,5…1,0 мкм. Значительное количество снятых точек позволяет существенно уменьшить ошибку определения геометрических параметров оси ротора.

Измерение углов ориентации стола

Для измерения положения и ориентации стола относительно оси ротора достаточно отсканировать его вертикальную грань (см. рис. 4). Это даст возможность получить уравнение плоскости грани, а значит определить расстояние до оси вращения и два угла, характеризующие ее неперпендикулярность к радиусу. Заметим, что если углы ориентации грани определяются достаточно точно на основе измерения плоскости центра отражателя при сканировании, то в расстояние от оси вращения непосредственно входит ошибка уголкового отражателя (3…6 мкм).

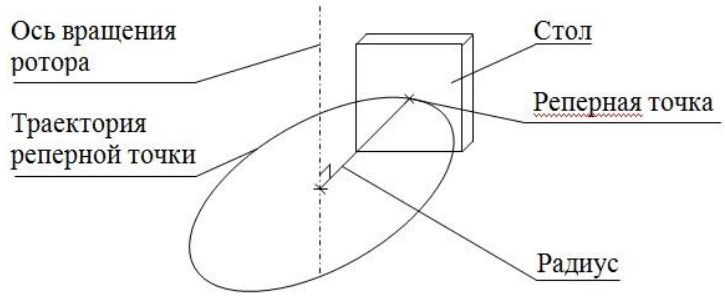


Рис. 4. К определению геометрических параметров оси ротора и положения стола

Третий угол, определяющий поворот вокруг радиуса, в рамках указанной методики не удается измерить с высокой точностью (его ошибка при сканировании верхнего ребра окажется в пределах 10”). Измерение третьего угла должно быть выполнено отдельно сканированием другой вертикальной или горизонтальной грани с другой позиции трекера.

Возможно, что эту ошибку измерения удастся уменьшить с помощью индуктивных вихревых датчиков.

Таким образом, можно предположить, что использование лазерного трекера в прецизионной центрифуге позволит получить дополнительную информацию о геометрических параметрах установки с высокой точностью. Лазерный трекер API Tracker3 оснащен интерферометром с погрешностью $2\sigma = 0{,}5$ мкм.

В идеальном случае радиус траектории реперной точки на столе может быть определен с точностью не хуже 7 мкм. Координаты оси вращения могут быть определены с ошибкой – не хуже 2 мкм, а ее отклонение от вертикали – не хуже, чем 3”.

Отклонение плоскости стола от параллельности оси вращения и перпендикулярности радиусу может быть измерено с точностью не хуже 2”, а отклонение от горизонтального положения верхней грани стола при его малом повороте вокруг радиуса – не хуже 3”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испытательная техника: Справочник: В 2 кн. / Под ред. В. В. Клюева. — Москва: Машиностроение, 1982. Кн. 1 / Г. С. Батуев, А. С. Больших, В. С. Голубков и др. — 1982 .— 528 с. + (ил.).
2. П.А. Андриенко, В.И. Каразин, Д.П. Козликин, И.О. Хлебосолов. Воспроизведение линейных ускорений на поступательных стендах // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 128-137.
3. Козликин Д.П., Каразин В.И., Хлебосолов И.О. О воспроизведении виброротационных воздействий [Текст] // Наука и технологии. Секция 3. Динамика и прочность. Краткие сообщения XXVIII Российской школы. – Екатеринбург. УрО РАН, 2009. – С. 42-44.
4. П.А. Андриенко, В.И. Каразин, И.О. Хлебосолов. Об испытаниях на комбинированные воздействия // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. -СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 142-150.
5. А.Н. Евграфов, В.И. Каразин, И.О. Хлебосолов. Воспроизведение параметров движения на ротационных стендах // Теория механизмов и машин.: Периодический научно-методический журнал. №1. Том 1. 2003. – С. 92-96.
6. А.Н. Евграфов, В.И. Каразин, И.О. Хлебосолов. Экспериментальное определение инерционных параметров изделий // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 205-211.
7. Евграфов А.Н., Каразин В.И., Смирнов Г.А. Роторные стенды для воспроизведения параметров движения // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – СПб.: СПбГТУ, 1999. №3(17). С. 89-94.
8. Каразин В.И., Хлебосолов И.О. Динамика инерционного стенда с деформируемыми звеньями // Испытательные и поверочные стенды. Л.: ЛГТУ, 1992. С. 32-35.

УДК 519.711

А.П. Борина, В.А. Терешин

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ПРОСТРАНСТВЕННОМ ДВИЖЕНИИ СТАТИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА



Анастасия Петровна Борина, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812) 297-48-45, E-mail: kamchatka1@rambler.ru



Валерий Алексеевич Терешин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812) 297-48-45, E-mail: terva@mail.ru

Аннотация

В работе исследуется возможность управления статически неустойчивым двуногим шагающим аппаратом в течение одного шага. Учитывая инерционные свойства и изменение длин ног аппарата, подбирая коэффициенты обратных связей, моменты и место опоры, удалось смоделировать четыре шага ходьбы. В основу математической модели положено пространственное движение перевернутого физического маятника с тремя независимыми управляющими воздействиями. В дифференциальных уравнениях движения сохранены величины до второго порядка малости.

Ключевые слова: шагающие аппараты, система управления, стабилизация движения.

A. P. Borina, V. A. Tereshin

SOLUTION OF THE PROBLEM OF SPATIAL MOTION OF A STATICALLY UNSTABLE WALKING MACHINE

Anastasia P. Borina[1], Dr. Valery A. Tereshin[1],
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

The article is devoted questions of management of dynamic biped walking machine over a single step. Four steps walk was modeled in view inertial properties, changing the lengths of the legs of the machine, the coefficients of the feedbacks and the time and the place of putting leg. The basis of the mathematical model is the spatial motion of an inverted physical pendulum with three independent control actions. In the differential equations of motion the values up to the second order of smallness are saved.

Key words: walking machines, control system, motion stabilization.

Шагающие аппараты на резко пересеченной местности, в зонах разрушений, при освоении океана и космоса могут оказаться эффективнее других транспортных средств. Высокие требования к проходимости, маневренности и быстродействию привели к созданию двуногих шагающих аппаратов, обладающих значительной статической устойчивостью из-за наличия развитых ступней. В данной работе исследуется возможность управления статически неустойчивым двуногим шагающим роботом. Предполагается, что такой класс аппаратов будет значительно превосходить все существующие по быстродействию [5]. Управление шагающим аппаратом как транспортным средством должно обеспечить близость к требуемому движению, устойчивость и комфортабельность ходьбы [4]. В [1], [3] получены уравнения движения такого аппарата (см. рис.1) в течение одного шага под действием управляющих воздействий со стороны ноги.

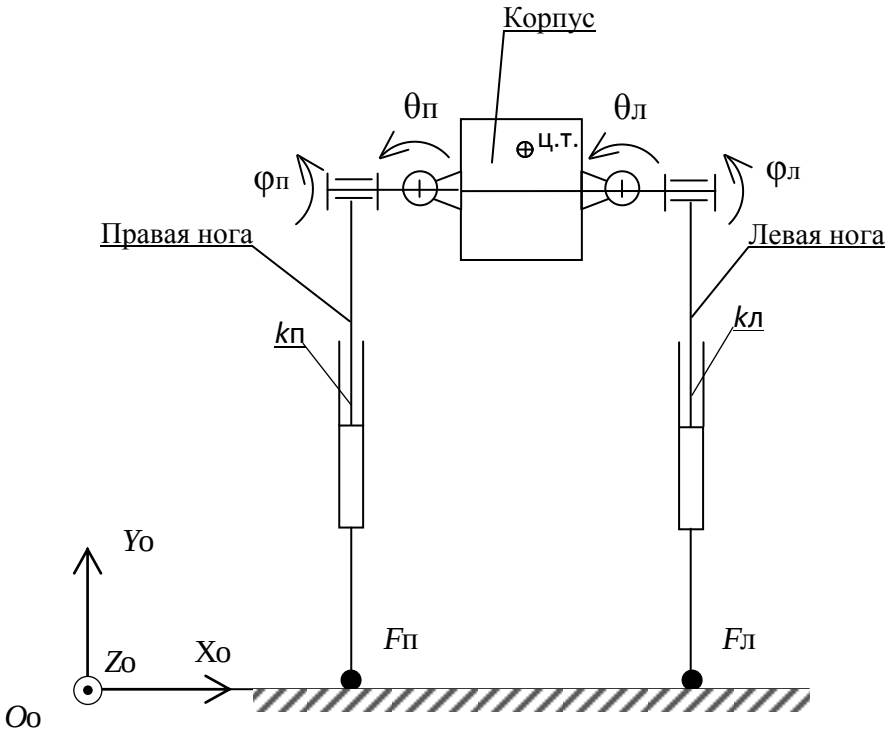


Рис.1. Кинематическая схема шагающего аппарата

На рис.1 обозначены θ, φ - углы поворота в тазобедренных суставах; k- длины ног, индексы л и п соответствуют левой и правой ноге. В этих обозначениях уравнения движения аппарата как абсолютно твердого тела на невесомых ногах во время одного шага имеют следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}
-m\ddot{x} + M_{\theta л}\frac{\partial \theta_л}{\partial x} + M_{\varphi л}\frac{\partial \varphi_л}{\partial x} + R_л\frac{\partial k_л}{\partial x} = 0\\
-m(\ddot{y} + g) + M_{\theta л}\frac{\partial \theta_л}{\partial y} + M_{\varphi л}\frac{\partial \varphi_л}{\partial y} + R_л\frac{\partial k_л}{\partial y} = 0\\
-m\ddot{z} + M_{\theta л}\frac{\partial \theta_л}{\partial z} + M_{\varphi л}\frac{\partial \varphi_л}{\partial z} + R_л\frac{\partial k_л}{\partial z} = 0\\
M^{\Phi}_{zk1} + M_{\theta л}\frac{\partial \theta_л}{\partial \alpha} + M_{\varphi л}\frac{\partial \varphi_л}{\partial \alpha} + R_л\frac{\partial k_л}{\partial \alpha} = 0\\
M^{\Phi}_{zk2} + M_{\theta л}\frac{\partial \theta_л}{\partial \beta} + M_{\varphi л}\frac{\partial \varphi_л}{\partial \beta} + R_л\frac{\partial k_л}{\partial \beta} = 0\\
M^{\Phi}_{zk3} + M_{\theta л}\frac{\partial \theta_л}{\partial \gamma} + M_{\varphi л}\frac{\partial \varphi_л}{\partial \gamma} + R_л\frac{\partial k_л}{\partial \gamma} = 0
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ – проекции абсолютного ускорения центра масс корпуса аппарата; M^{Φ}_{zk1}, M^{Φ}_{zk2}, M^{Φ}_{zk3} - проекции главного момента сил инерции на оси промежуточных систем координат [7]; mg - вес корпуса; $R_л$, $M_{\theta л}$, $M_{\varphi л}$, движущая сила и моменты в приводах; α, β, γ, x, y, z – углы конечного поворота и координаты центра тяжести корпуса.

Дополнив уравнения (1) выражениями, характеризующими работу системы управления с обратными связями [10], получим замкнутую систему уравнений, позволяющую моделировать движение шагающего аппарата. Запишем явные выражения собственных координат левой ноги $\theta_л$, $\varphi_л$, $k_л$ как функции независимых переменных координат корпуса α, β, γ, x, y, z и левой стопы $x_л$, $y_л$, $z_л$. b_x, b_y, b_z – координаты центра тазобедренного сустава в главных центральных осях корпуса.

$$\theta_л = -arctg\left(\frac{p}{q}\right),$$

где

$$p = \mathrm{b_x} + (x - x_л)\cos(\beta)\cos(\gamma) + (y - y_л)\big(\cos(\alpha)\sin(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma)\big) + \\ +(z - z_л)\big(\sin(\alpha)\sin(\gamma) - \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma)\big),$$

$$q = b_\mathrm{y} - (x - x_л)\cos(\beta)\sin(\gamma) + (y - y_л)\big(\cos(\alpha)\cos(\gamma) - \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma)\big) + \\ +(z - z_л)\big(\sin(\alpha)\cos(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma)\big);$$

$$\varphi_л = -arctg\frac{\sin(\theta_л)\left((x-x_л)\sin(\beta)-(y-y_л)\cos(\beta)\sin(\alpha)+(z-z_л)\cos(\beta)\cos(\alpha)\right)}{p};$$

$$k_л = \frac{b_z+(x-x_л)\sin(\beta)-(y-y_л)\cos(\beta)\sin(\alpha)+(z-z_л)\cos(\beta)\cos(\alpha)}{\sin(\varphi_л)};$$

В силу малости углов α, β и γ заменим $sin(\alpha)\approx\alpha$, $sin(\beta)\approx\beta$, $sin(\gamma)\approx\gamma$, $cos(\alpha)\approx 1-\alpha^2/2$, $cos(\beta)\approx 1-\beta^2/2$, $cos(\gamma)\approx 1-\gamma^2/2$, сохранив величины второго порядка малости [8]. Тогда выражения для $\theta_л$, $\varphi_л$, $k_л$ примут вид:

$$\theta_л = -\frac{p}{q},$$

где

$$p = b_x+(x-x_л)(1-\gamma^2/2-\beta^2/2)+(y-y_л)(\gamma+\alpha\beta)+(z-z_л)(\alpha\gamma-\beta);$$

$$q = b_y-(x-x_л)\gamma+(y-y_л)(1-\alpha^2/2-\gamma^2/2)+(z-z_л)(\alpha+\beta\gamma);$$

$$\varphi_л = -\frac{b_z-\beta x_л+\alpha y_л+\beta x-\alpha y+(z-z_л)(1-\alpha^2/2-\beta^2/2)}{\sqrt{p^2+q^2}};$$

$$k_л = \sqrt{p^2+q^2+(b_z+(x-x_л)\beta-(y-y_л)\alpha+(z-z_л)(1-\alpha^2/2-\beta^2/2))^2};$$

Найдем частные производные от $\theta_л$, $\varphi_л$, $k_л$ по α, β, γ, *x*, *y* и *z*, имеющиеся в системе (1).

$$\frac{\partial\theta_л}{\partial\alpha} = -\frac{(y-y_л)(\beta-\alpha\gamma)+(z-z_л)(\alpha\beta+\gamma)}{q^2}+\frac{p^2\cdot a1}{(q^2)^2},$$

где $$a1 = (y_л-y)(\alpha+\beta\gamma)+(z-z_л);$$

$$\frac{\partial\varphi_л}{\partial\alpha} = \frac{(y_л-y)+(z_л-z)\alpha}{\sqrt{p^2+q^2}}+\frac{(\varphi_л)(q^2\cdot a1+p^2\cdot a2)}{(p^2+q^2)},$$

где $$a2 = (y_л-y)(\alpha\gamma-\beta)+(z-z_л)(\gamma+\alpha\beta);$$

$$\frac{\partial k_л}{\partial\alpha} =$$

$$= \frac{q^2\cdot a1+p^2\cdot a2+(b_z+(x-x_л)\beta-(y-y_л)\alpha+z-z_л)\cdot(y_л-y+(z_л-z)\alpha)}{k_л};$$

$$\frac{\partial \theta_л}{\partial \beta} = -\frac{(x_л - x)\beta + (y - y_л)\alpha - (z - z_л)}{q^2} + \frac{p^2 \cdot b1}{(q^2)^2},$$

где $$b1 = (x - x_л)\beta\gamma + (y_л - y)\alpha\gamma + (z - z_л)\gamma;$$

$$\frac{\partial \varphi_л}{\partial \beta} = \frac{x - x_л - (y_л - y)\alpha\beta + (z_л - z)\beta}{\sqrt{p^2 + q^2}} + \frac{(\varphi_л)(q^2 \cdot b1 + p^2 \cdot b2)}{(p^2 + q^2)},$$

где $$b2 = (x_л - x)\beta + (y - y_л)\alpha - z + z_л;$$

$$\frac{\partial k_л}{\partial \beta} = \frac{1}{k_л}(q^2 \cdot b1 + p^2 \cdot b2 +$$

$$+(b_z + (x - x_л)\beta - (y - y_л)\alpha + z - z_л) \cdot (x - x_л + (y - y_л)\alpha\beta + (z_л - z)\beta));$$

$$\frac{\partial \theta_л}{\partial \gamma} = -\frac{(x_л - x)\gamma + (y - y_л)(1 - \alpha\beta\gamma) + (z - z_л)(\alpha + \beta\gamma)}{q^2} + \frac{p^2 \cdot g1}{(q^2)^2},$$

где $$g1 = (x_л - x) + (y_л - y)(\alpha\beta + \gamma) + (z - z_л)(\beta - \alpha\gamma);$$

$$\frac{\partial \varphi_л}{\partial \gamma} = \frac{(\varphi_л)(q^2 \cdot g1 + p^2 \cdot g2)}{(p^2 + q^2)},$$

где $$g2 = (x_л - x)\gamma + (y - y_л) + (z - z_л)(\alpha + \beta\gamma);$$

$$\frac{\partial k_л}{\partial \gamma} = \frac{1}{k_л}(q^2 \cdot g1 + p^2 \cdot g2);$$

$$\frac{\partial \theta_л}{\partial x} = -\frac{1}{q^2} + \frac{p^2 \cdot \gamma}{(q^2)^2};$$

$$\frac{\partial \varphi_л}{\partial x} = \frac{\beta}{\sqrt{p^2 + q^2}} + \frac{(\varphi_л)(-q^2\gamma + p^2)}{(p^2 + q^2)};$$

$$\frac{\partial k_л}{\partial x} = \frac{-q^2\gamma + p^2 + (b_z + (x - x_л)\beta - (y - y_л)\alpha + z - z_л) \cdot \beta)}{k_л};$$

$$\frac{\partial \theta_л}{\partial y} = -\frac{\alpha\beta + \gamma}{q^2} + \frac{p^2}{(q^2)^2};$$

$$\frac{\partial \varphi_{л}}{\partial y} = -\frac{\alpha}{\sqrt{p^2+q^2}} + \frac{(\varphi_{л})\left(q^2+p^2(\alpha\beta+\gamma)\right)}{(p^2+q^2)};$$

$$\frac{\partial k_{л}}{\partial y} = \frac{q^2+p^2(\alpha\beta+\gamma)-(b_z+(x-x_{л})\beta-(y-y_{л})\alpha+z-z_{л})\alpha)}{k_{л}};$$

$$\frac{\partial \theta_{л}}{\partial z} = -\frac{-\beta+\alpha\gamma}{q^2} + \frac{p^2\cdot(\alpha+\beta\gamma)}{(q^2)^2};$$

$$\frac{\partial \varphi_{л}}{\partial z} = \frac{1}{\sqrt{p^2+q^2}} + \frac{(\varphi_{л})(q^2(\alpha+\beta\gamma)+p^2(\alpha\gamma-\beta))}{(p^2+q^2)};$$

$$\frac{\partial k_{л}}{\partial z} = \frac{q^2(\alpha+\beta\gamma)+p^2(\alpha\gamma-\beta)+b_z+(x-x_{л})\beta-(y-y_{л})\alpha+z-z_{л})}{k_{л}}.$$

Проекции вектора главного момента сил инерции с точностью до величин второго порядка малости:

$$M^{\Phi}_{zk1} = J_x(\ddot{\beta}\gamma+\ddot{\alpha}+\dot{\beta}\dot{\gamma}-\dot{\beta}\dot{\alpha}\beta-\dot{\alpha}\dot{\gamma}\gamma)+(J_z-J_y)\dot{\alpha}(\dot{\gamma}+\dot{\alpha}\beta);$$

$$M^{\Phi}_{zk2} = J_y(\ddot{\beta}-\ddot{\alpha}\gamma-\dot{\beta}\dot{\gamma}\gamma-\dot{\alpha}\dot{\gamma}+\dot{\alpha}\dot{\beta}\beta\gamma)-(J_x-J_z)\dot{\beta}(\dot{\gamma}+\dot{\alpha}\beta);$$

$$M^{\Phi}_{zk3} = J_z\left(\ddot{\gamma}-\ddot{\alpha}\beta+\dot{\alpha}\dot{\beta}\right)+(J_x-J_y)\dot{\beta}\dot{\alpha},$$

где *Jx*, *Jy*, *Jz* – моменты инерции корпуса относительно главных центральных осей координат. Примем в качестве передаточных функций цепей обратных связей ПД – регуляторы по всем трем степеням подвижности левой и правой ног. Пусть управление осуществляется непосредственно движущими силами и моментами независимыми по сигналам рассогласования.

$$\left.\begin{aligned} M_{\theta л} &= -k_{p\theta}(\gamma-\gamma_{П})-k_{d\theta}(\dot{\gamma}-\dot{\gamma}_{П}) \\ M_{\varphi л} &= -k_{p\varphi}\alpha-k_{d\varphi}\dot{\alpha} \\ R_{л} &= -k_{pR}\left(y-(L-b_y)\right)-k_{dR}\dot{y}+mg \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где $\gamma_{\text{П}} = -0.02\,sin\left(\frac{2\pi t}{1.5}\right)$ – программное движение; $k_{p\theta} = 175000$, $k_{d\theta} = 17500$, $k_{p\varphi} = 7010$, $k_{d\varphi} = 701$, $k_{pR} = 140000$, $k_{dR} = 14000$ – коэффициенты обратных связей; L и $(L - b_y)$ – высота центра тазобедренного сустава и центра тяжести корпуса, соответственно. Дополним полученную систему уравнений движения (1), (2) начальными условиями и численными значениями параметров, записанными системе СИ.

$$\alpha(0) = 0, \beta(0) = 0, \gamma(0) = 0, x(0) = 0, y(0) = 1.25, z(0) = 0,$$
$$\dot{\alpha}(0) = 0, \dot{\beta}(0) = 0.014, \dot{\gamma}(0) = 0, \dot{x}(0) = 0.318, \dot{y}(0) = 0, \dot{z}(0) = 0.908,$$
$$x_{\text{л}} = 0.15,\ y_{\text{л}} = 0, z_{\text{л}} = 0.25, b_x = 0.15, b_y = -0.3, b_z = 0, L = 0.95,$$
$$J_x = 100, J_y = 100, J_z = 100,\ \ m = 200, g = 9.81.$$

Для численного решения системы (1), (2) воспользуемся средой *Maple* 15. При моделировании ходьбы [2] решение будем искать на каждом шаге во временном промежутке от нуля до полутора секунд. Для начала расчета следующего шага необходимо определить момент времени окончания текущего шага $t1$, при котором значение $\dot{z}(t1) = \dot{z}(0)$. Моменту начала движения на следующем шаге (на правой ноге) присвоим значение $t = 0$. Примем начальные условия по координатам $\alpha(0) = \alpha(t1)$, $\beta(0) = \beta(t1)$, $\gamma(0) = \gamma(t1)$, $x(0) = 0$, $y(0) = y(t1)$, $z(0) = 0$. Начальные условия по скоростям примем равными значениям в конце $(t1)$ текущего шага [9]. Не следует забывать, что при переходе на правую ногу в системе уравнений (1), (2) значение параметра b_x меняет знак.

Наиболее сложной задачей, решение которой определяет ходьбу, является ответ на вопрос «когда и куда следует поставить ногу для начала очередного шага?» [2]. В наших обозначениях – это координаты $x_{\text{л}}$ и $z_{\text{л}}$. Решение этой задачи выходит за рамки данной статьи. Здесь мы ограничимся лишь результатами счета нескольких шагов при вручную подобранных местах постановки ног [6] для иллюстрации возможностей работы системы управления нижнего уровня.

При заданных начальных условиях и параметрах шагающего аппарата результаты численного решения для левой и правой ног будут иметь следующий вид (рис.2 и 3).

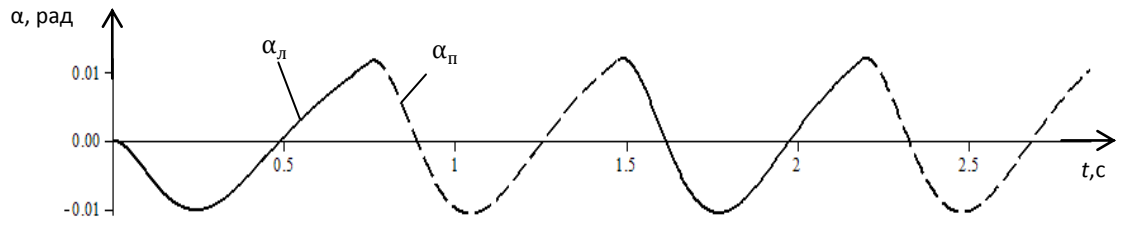


Рис. 2а

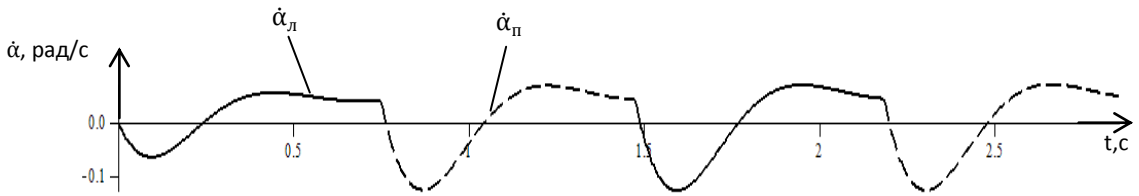


Рис. 2б

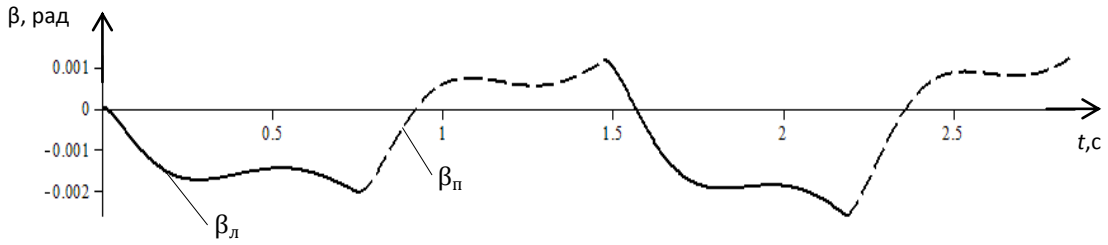


Рис. 2в

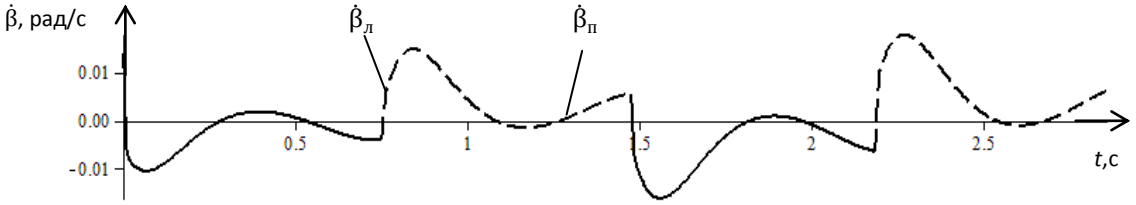


Рис. 2г

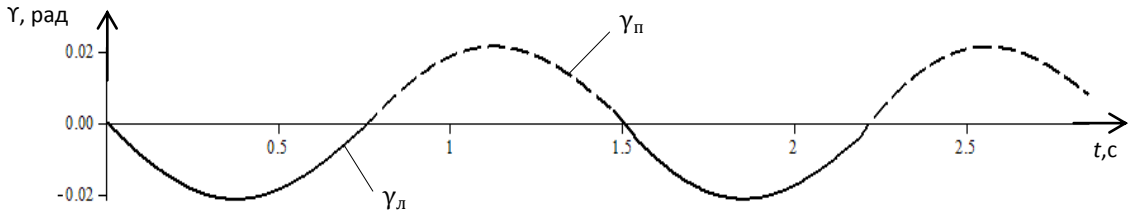


Рис. 2д

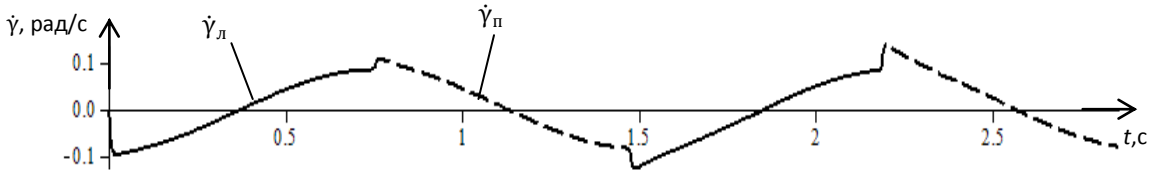


Рис. 2е

Рис. 2а-2е. Законы изменения углов конечного поворота корпуса аппарата и их скоростей

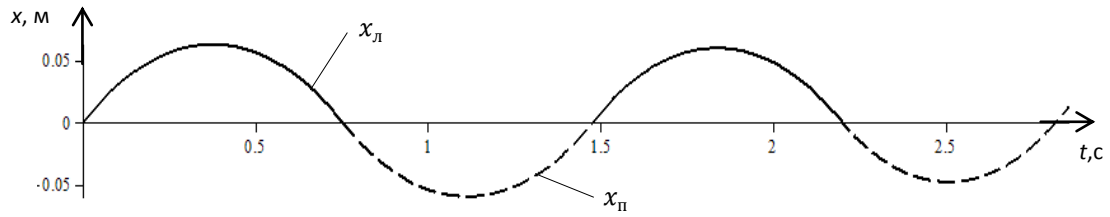


Рис. 3а

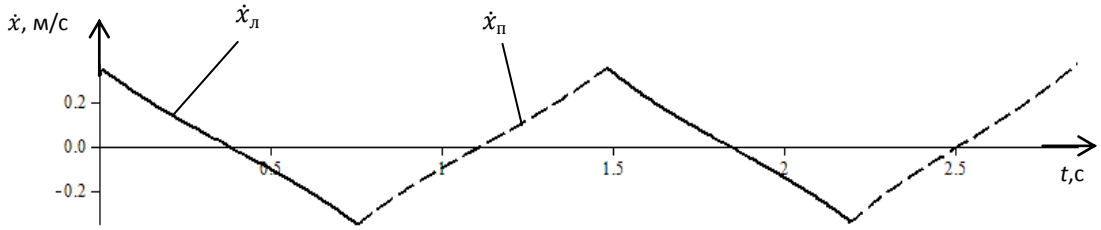


Рис. 3а

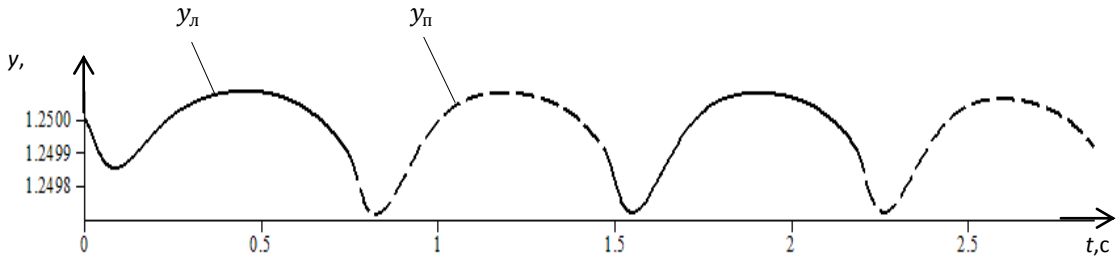


Рис. 3в

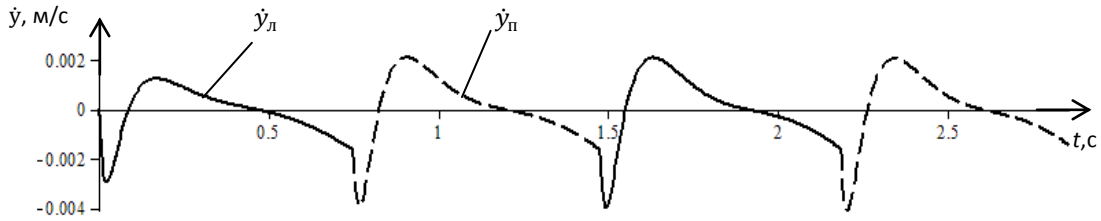


Рис. 3г

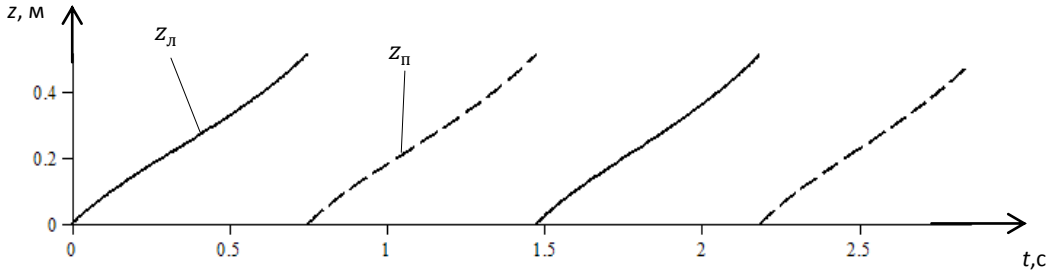


Рис. 3д

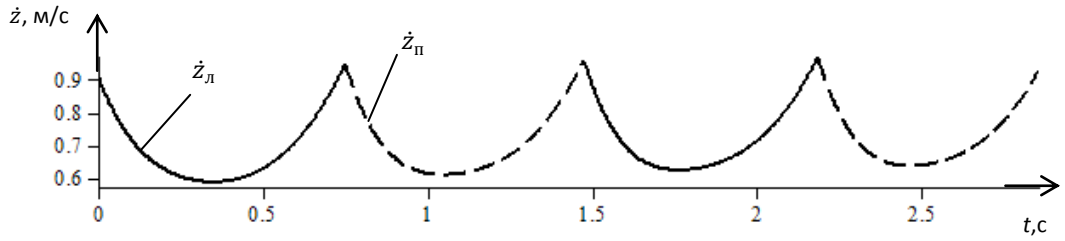


Рис. 3е

.

Рис. 3а-3е. Законы изменения координат полюса корпуса и их скоростей

На основе уравнений движения, содержащих величины второго порядка малости, показана возможность стабилизации плавного перемещения корпуса шагающего аппарата с помощью трех независимых каналов управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борина А.П., Терешин В.А. Пространственное движение шагающего аппарата под действием управляющего воздействия со стороны ноги. Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы второй международной научно-практической конференции 14-15 июня 2012 года. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012, С. 177-188
2. Борина А.П., Терешин В.А. Исследование управления плоской ходьбой статически неустойчивого шагающего аппарата. Старт в будущее: Научн.-технич. конф. Труды второй научн.-технич. конф. Молодых специалистов / ОАО «КБСМ». – СПб.: 2011. С. 124
3. Евграфов А.Н., Терешин В.А., Хростицкий А.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями. Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011, № 2. – с. 170-176
4. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. О некоторых критериях качества, используемых при компьютеризированном синтезе механизмов. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й международной научно-технической конференции. 14-15 июня 2012 года, Санкт-Петербург / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 48-52
5. Козлов В.В., Макарычев В.П., Тимофеев А.В., Юрьевич Е.И. Динамика управления роботами. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.-336 с.
6. Петров Г.Н. Компьютерное моделирование механических систем в среде «Model Vision». Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009, № 91. – с. 239-244

7. Семенов Ю.А. Динамика машин, ч.1 (серия «Механика в политехническом университете»): Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 318 с.
8. Семенов Ю.А. Механика. Теория механических колебаний: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 412 с.
9. Терешин В.А. Об управлении двуногой ходьбой. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы Международной научно-практической конференции. 14 – 15 июня 2011 года, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, С. 370-374
10. Теория механизмов и машин: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений /М.З.Коловский, А.Н.Евграфов, Ю.А.Семенов, А.В.Слоущ. 3-е изд., испр. М.: Изд. центр «Академия», 2008. 560 с.

УДК 621.01

С.Н.Бъчваров, В.Д. Златанов

МЕТОД ИНВЕРСИИ В КИНЕМАТИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА



Стефан Николов Бъчваров, д.т.н., профессор кафедры “Механика”
Технический Университет – София
Студентски град-София-1756, Болгария.



Васил Димитров Златанов, доктор (к.т.н.), доцент кафедры “Техническая механика и машиноведения”
Университет Пищевых Технологии - Пловдив
бул. Марица 26, Пловдив 4002, Болгария.
Тел.: +359 (32) 603827, E-mail: vassilzlatanov@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрен один метод для определения кинематических уравнений Эйлера, используя методов триэдра (метод Поасона) и инверсии.

Ключевые слова: метод инверсии, кинематические уравнения Эйлера.

S. N. Bachvarov, V. D. Zlatanov

INVERSION METHOD IN KINEMATICS OF THE RIGID BODY

Prof. Stefan N. Bachvarov[1],
Ass. Prof. Vassil D. Zlatanov[2], e-mail: vassilzlatanov@mail.ru
[1]Technical University-Sofia, Sofia, Bulgaria,
[2]University of Food Technologies, Plovdiv, Bulgaria.

Abstract

The article is devoted one approach for definition of the kinematic equations of Euler, using trihedron method (Poisson’s method) and inversion method.

Key words: a inversion method, kinematic equations of Euler.

Движение твердого тела в определенной среде является последовательным совпадением точек тела с различными точками среды [2,4,7,8,12,13 и др.]. Движение нам известно, если мы в состоянии опреде-

лить движение (положение, скорость, ускорение) каждой его точки [1,3,4,5,6,9,10,11,14]. Движение имеет двойственный характер, а именно, когда одна среда движется в другой, то и вторая среда движется в первой. Эти движения могут различаться между собой и одно из них называем прямым, а второе – обращенным (инверсионным) движение. Какое из них назовем прямым или обращенным, зависит от нашего выбора.

В работе представлен метод для определения кинематических уравнений Эйлера, используя методов триэдра (метод Поасона) и инверсии.

Наиболее общее движение идеально твердого тела в пространстве имеет шесть степеней свободы и его положение определяется шестью независимыми один от другого параметрами (обобщенные координаты). Чтобы определить эти параметры, наряду с инерциальной (неподвижной) системой осей *Oxyz* вводится и система подвижных осей $Ax'y'z'$, неизменно связанных с телом (подвижная среда) и имеющих начало (полюс) A в произвольно выбранной точке тела (рис.1). Положение системы осей $Ax'y'z'$ задается координатами x_A, y_A, z_A полюса A (или его радиус-вектором $\mathbf{r}_A = \mathbf{OA}$) и девятью косинусами углов между осями *Oxyz* и $Ax'y'z'$. Эта система координат вполне определяет положение и перемещение твердого тела. Между косинусами существуют шесть зависимостей и независимые координаты, определяющие положение твердого тела остаются лишь шесть: три координаты x_A, y_A, z_A и три из указанных косинусов, одновременно не входящие в какое-либо из соотношений. Вместо трех таких косинусов обыкновенно берут три угла Эйлера [12].

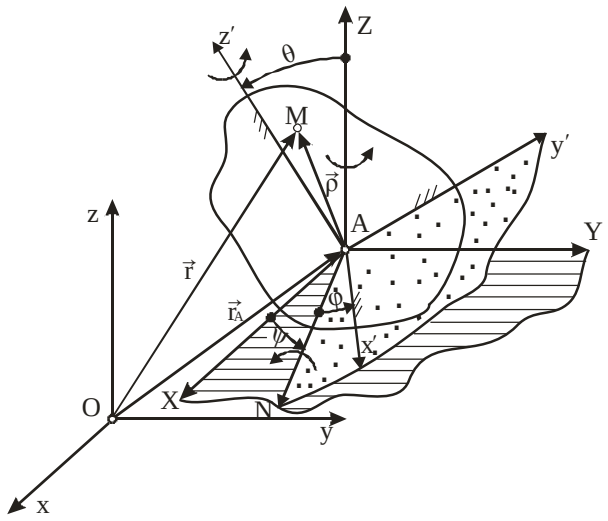


Рис. 1

Радиус-векторы $\mathbf{r}$, $\boldsymbol{\rho}$ произвольной точки M тела относительно *Oxyz*, $Ax'y'z'$ и радиус-вектор $\mathbf{r}_A$ связаны соотношением $\mathbf{r} = \mathbf{r}_A + \boldsymbol{\rho}$, которое записываем в виде $\mathbf{r} = \mathbf{r}_A + x'\mathbf{i}'_1 + y'\mathbf{i}'_2 + z'\mathbf{i}'_3$. Дифференцируя по времени и учитывая, что x', y', z' постоянные величины, получаем:

$$\dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{r}}_A + x'\frac{d\,\mathbf{i}_1'}{dt} + y'\frac{d\,\mathbf{i}_2'}{dt} + z'\frac{d\,\mathbf{i}_3'}{dt}, \tag{1}$$

где $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}} = \dot{x}\mathbf{i}_1 + \dot{y}\mathbf{i}_2 + \dot{z}\mathbf{i}_3$ и $\mathbf{v}_A = \dot{\mathbf{r}}_A = \dot{x}_A\mathbf{i}_1 + \dot{y}_A\mathbf{i}_2 + \dot{z}_A\mathbf{i}_3$ векторы скорости точек M и A тела.

Векторы $\dot{\mathbf{i}}_1', \dot{\mathbf{i}}_2', \dot{\mathbf{i}}_3'$ представляем как их линейные комбинации, т.е. в виде:

$$\frac{d\mathbf{i}_s'}{dt} = \omega_{s1}\mathbf{i}_1' + \omega_{s2}\mathbf{i}_2' + \omega_{s3}\mathbf{i}_3' \quad (s = 1,2,3) \tag{2}$$

где $\omega_{sk}\,(s,k = 1,2,3)$ являются коэффициентами, подлежащими определению. Для определения этих коэффициентов, исходим из соотношения $\mathbf{i}_k'.\mathbf{i}_m' = \delta_{km} = \begin{cases} 1 & (k = m), \\ 0 & (k \neq m), \end{cases}$, которые после дифференцирования, замещая в них выражения из (2), получаем:

$$\begin{aligned} &\omega_{11} = 0 \quad , \quad \omega_{22} = 0 \quad , \quad \omega_{33} = 0 \ , \\ &\omega_{13} = -\omega_{31} \quad , \quad \omega_{32} = -\omega_{23} \quad , \quad \omega_{21} = -\omega_{12}\,. \end{aligned} \tag{3}$$

Отсюда следует, что из девяти коэффициентов ω_{sk} независимыми являются только три, а матрица, образованная ими – антисимметрична.

Вводим вектора моментная угловая скорость тела:

$$\boldsymbol{\omega} = \omega_{23}\mathbf{i}_1' + \omega_{31}\mathbf{i}_2' + \omega_{12}\mathbf{i}_3',$$

где $\omega_{23} = \omega_{x'}$, $\omega_{31} = \omega_{y'}$, $\omega_{12} = \omega_{z'}$ являются ее проекциями на подвижные координатные оси Ax', Ay', Az' связанные с телом. Имея в виду (3), производные единичных векторов $\mathbf{i}_1', \mathbf{i}_2', \mathbf{i}_3'$ представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{i}_1'}{dt} &= \omega_{12}\mathbf{i}_2' - \omega_{31}\mathbf{i}_3' = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{i}_1', \\ \frac{d\mathbf{i}_2'}{dt} &= -\omega_{12}\mathbf{i}_1' + \omega_{23}\mathbf{i}_3' = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{i}_2', \\ \frac{d\mathbf{i}_3'}{dt} &= \omega_{31}\mathbf{i}_1' - \omega_{23}\mathbf{i}_2' = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{i}_3', \end{aligned} \tag{4}$$

названы формулы Поасона (Poisson).

Используя (4), формула распределения скоростей точек твердого тела (1) принимает вид:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_A + \boldsymbol{\omega} \times \left(x'\mathbf{i}_1' + y'\mathbf{i}_2' + z'\mathbf{i}_3'\right) \text{ или } \mathbf{v} = \mathbf{v}_A + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}\,, \tag{5}$$

где $\boldsymbol{\rho} = x'\mathbf{i}_1' + y'\mathbf{i}_2' + z'\mathbf{i}_3'$. При этом второе слагаемое в формуле выражает производную по времени вектора $\boldsymbol{\rho}$, т.е. $\frac{d\boldsymbol{\rho}}{dx} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}$.

Проекции вектора $\boldsymbol{\omega}$ на оси подвижного триэдра $Ax'y'z'$ находим из выражения (4), умножая их соответственно на $\mathbf{i}_1', \mathbf{i}_2', \mathbf{i}_3'$ и выражая скалярные

произведения через косинусы углов (компоненты единичных векторов)- $a_{ks}=\mathbf{i}'_s.\mathbf{i}_k\ (s,k=1,2,3)$ и их производные. Находим:

$$\omega_{23}=\omega_{x'}=\frac{d\mathbf{i}'_2}{dt}.\mathbf{i}'_3=-\mathbf{i}'_2.\frac{d\mathbf{i}'_3}{dt}=\dot{a}_{12}a_{13}+\dot{a}_{22}a_{23}+\dot{a}_{32}a_{33},$$

$$\omega_{31}=\omega_{y'}=\frac{d\mathbf{i}'_3}{dt}.\mathbf{i}'_1=-\mathbf{i}'_3.\frac{d\mathbf{i}'_1}{dt}=\dot{a}_{13}a_{11}+\dot{a}_{23}a_{21}+\dot{a}_{33}a_{31}, \qquad (6)$$

$$\omega_{12}=\omega_{z'}=\frac{d\mathbf{i}'_1}{dt}.\mathbf{i}'_2=-\mathbf{i}'_1.\frac{d\mathbf{i}'_2}{dt}=\dot{a}_{11}a_{12}+\dot{a}_{21}a_{22}+\dot{a}_{31}a_{32}.$$

Для нахождения проекций вектора $\boldsymbol{\omega}$ на оси неподвижного триэдра $Oxyz$, *совершаем инверсию движения*, т.е. систему $Ax'y'z'$, связанную с телом, считаем инерциальной, а триэдра $Oxyz$- подвижной. Радиус-вектор $\mathbf{r}$ точки М записываем в виде $\mathbf{r}=\mathbf{r}_A+\boldsymbol{\rho}=\mathbf{r}_A+X\mathbf{i}_1+Y\mathbf{i}_2+Z\mathbf{i}_3$, где $X=x-x_A$, $Y=y-y_A$, $Z=z-z_A$ и находим относительную (локальную) производную векторного равенства относительно триэдра $Oxyz$. Имеем:

$$\frac{d'\mathbf{r}}{dt}=\frac{d'\mathbf{r}_A}{dt}+\frac{d'\boldsymbol{\rho}}{dt}\Rightarrow\dot{x}\mathbf{i}_1+\dot{y}\mathbf{i}_2+\dot{z}\mathbf{i}_3=\dot{x}_A\mathbf{i}_1+\dot{y}_A\mathbf{i}_2+\dot{z}_A\mathbf{i}_3+\frac{d'\boldsymbol{\rho}}{dt}\Rightarrow\mathbf{v}=\mathbf{v}_A+\frac{d'\boldsymbol{\rho}}{dt} \qquad (7)$$

Определяем абсолютную производную $\frac{d\boldsymbol{\rho}}{dt}$ относительно $Ax'y'z'$: $\frac{d\boldsymbol{\rho}}{dt}=\frac{d'\boldsymbol{\rho}}{dt}+X\dot{\mathbf{i}}_1+Y\dot{\mathbf{i}}_2+Z\dot{\mathbf{i}}_3$. Так как вектор $\boldsymbol{\rho}=const$ в $Ax'y'z'$, то $\frac{d\boldsymbol{\rho}}{dt}=0$. Следовательно:

$$\frac{d'\boldsymbol{\rho}}{dt}=-\left(X\dot{\mathbf{i}}_1+Y\dot{\mathbf{i}}_2+Z\dot{\mathbf{i}}_3\right) \qquad (8)$$

Производные по времени единичных векторов $\mathbf{i}_1,\mathbf{i}_2,\mathbf{i}_3$ представляем через линейное разложение в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{i}}_1=b_{11}\mathbf{i}_1+b_{12}\mathbf{i}_2+b_{13}\mathbf{i}_3\ ,\ \dot{\mathbf{i}}_2=b_{21}\mathbf{i}_1+b_{22}\mathbf{i}_2+b_{23}\mathbf{i}_3\ ,\ \dot{\mathbf{i}}_3=b_{31}\mathbf{i}_1+b_{32}\mathbf{i}_2+b_{33}\mathbf{i}_3,$$

где $b_{ik}\ (i,k=1,2,3)$ являются коэффициентами, подлежащими определению.

Вектора $\mathbf{i}_1,\mathbf{i}_2,\mathbf{i}_3$ подчинены зависимостям $\mathbf{i}_k.\mathbf{i}_m=\delta_{km}=\begin{cases}1\ (k=m),\\0\ (k\neq m),\end{cases}$ и аналогичным образом (3) находим:

$$b_{11}=0\ ,\ b_{22}=0\ ,\ b_{33}=0\ ,\ b_{13}=-b_{31}\ ,\ b_{32}=-b_{23}\ ,\ b_{21}=-b_{12} \qquad (9)$$

откуда следует, что из девяти коэффициентов b_{sk} независимыми являются также только три, а матрица, образованная ими антисимметричная.

Вводим вектора $\boldsymbol{\omega}^*$, представленный в виде

$$\boldsymbol{\omega}^*=b_{23}\mathbf{i}_1+b_{31}\mathbf{i}_2+b_{12}\mathbf{i}_3,$$

где $b_{23}=\omega_x^*,b_{31}=\omega_y^*,b_{12}=\omega_z^*$ являются его проекции на оси Ox,Oy,Oz или AX,AY,AZ.

Производные по времени единичных векторов $\mathbf{i}_1,\mathbf{i}_2,\mathbf{i}_3$, отчитывая результаты из (9) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}
\frac{d\mathbf{i}_1}{dt} &= b_{12}\mathbf{i}_2 - b_{31}\mathbf{i}_3 = \boldsymbol{\omega}^* \times \mathbf{i}_1, \\
\frac{d\mathbf{i}_2}{dt} &= -b_{12}\mathbf{i}_1 + b_{23}\mathbf{i}_3 = \boldsymbol{\omega}^* \times \mathbf{i}_2, \\
\frac{d\mathbf{i}_3}{dt} &= b_{31}\mathbf{i}_1 - b_{23}\mathbf{i}_2 = \boldsymbol{\omega}^* \times \mathbf{i}_3.
\end{aligned} \tag{10}$$

Замещая выражения (10) в (8), находим $\frac{d'\boldsymbol{\rho}}{dt} = -\boldsymbol{\omega}^* \times \boldsymbol{\rho}$, а из (7):

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_A - \boldsymbol{\omega}^* \times \boldsymbol{\rho} \tag{11}$$

Так как формулы (5) и (11) представляют одну и ту же скорость $\mathbf{v}$ точки M, следует что $\mathbf{v} = \mathbf{v}_A + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho} = \mathbf{v}_A - \boldsymbol{\omega}^* \times \boldsymbol{\rho}$. Можем теперь записать предыдущее равенства иначе: $\left(\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\omega}^*\right) \times \boldsymbol{\rho} = 0$, откуда из за произвольности вектора $\boldsymbol{\rho}$, следует:

$$\boldsymbol{\omega}^* = -\boldsymbol{\omega} \tag{12}$$

т.е. *угловая скорость инверсионного движения* $\boldsymbol{\omega}^*$ *равняется и противоположна угловой скорости* $\boldsymbol{\omega}$ *тела (прямого движения).*

Проекции вектора $\boldsymbol{\omega}^*$ на оси *Oxyz*, находим из выражений (10), умножая их соответственно на $\mathbf{i}_1,\mathbf{i}_2,\mathbf{i}_3$

$$\begin{aligned}
b_{23} = \omega_x^* &= \frac{d\mathbf{i}_2}{dt}.\mathbf{i}_3 = -\mathbf{i}_2.\frac{d\mathbf{i}_3}{dt}, \\
b_{31} = \omega_y^* &= \frac{d\mathbf{i}_3}{dt}.\mathbf{i}_1 = -\mathbf{i}_3.\frac{d\mathbf{i}_1}{dt}, \\
b_{12} = \omega_z^* &= \frac{d\mathbf{i}_1}{dt}.\mathbf{i}_2 = -\mathbf{i}_1.\frac{d\mathbf{i}_2}{dt},
\end{aligned} \tag{13}$$

Выражая скалярные произведения через указанные косинусы (компоненты единичных векторов $\mathbf{i}_1,\mathbf{i}_2,\mathbf{i}_3$) и их производные, находим:

$$\begin{aligned}
b_{23} = \omega_x^* &= \dot{a}_{21}a_{31} + \dot{a}_{22}a_{32} + \dot{a}_{23}a_{33} = -\left(a_{21}\dot{a}_{31} + a_{22}\dot{a}_{32} + a_{23}\dot{a}_{33}\right), \\
b_{31} = \omega_y^* &= \dot{a}_{31}a_{11} + \dot{a}_{32}a_{12} + \dot{a}_{33}a_{13} = -\left(a_{31}\dot{a}_{11} + a_{32}\dot{a}_{12} + a_{33}\dot{a}_{13}\right), \\
b_{12} = \omega_z^* &= \dot{a}_{11}a_{21} + \dot{a}_{12}a_{22} + \dot{a}_{13}a_{23} = -\left(a_{11}\dot{a}_{21} + a_{12}\dot{a}_{22} + a_{13}\dot{a}_{23}\right).
\end{aligned} \tag{14}$$

Представляем *метод для определения проекции угловой скорости тела через углы Эйлера и их производных*, что следует из представленной теории, где были использованы методы триэдра (метод Поасона) и инверсии. Этот подход базируется на формулах (6), (13) и подходящим способом находятся разложения единичных векторов осей и их производных по времени с помощью углов Эйлера.

- *Проекции угловой скорости на систему осей $Ax'y'z'$, неизменно связанные с телом*. В неподвижной координатной плоскости AXY проведем прямую AN' с единичным вектором $\mathbf{n}'$, а в подвижной координатной плоскости $Ax'y'$ - прямую AD с единичным вектором $\boldsymbol{\delta}$, которые во время движения остаются перпендикулярными линии узлов AN с единичным вектором $\mathbf{n}$ (Рис.2).

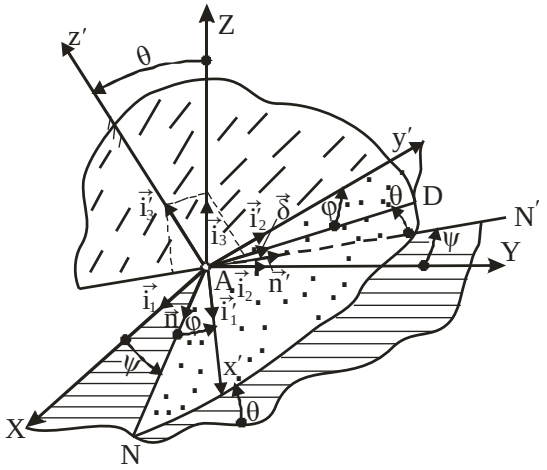


Рис. 2

Единичные вектора $\mathbf{i}_1'$ и $\mathbf{i}_2'$ осей Ax' и Ay' лежат в плоскости $Ax'y' \equiv AND$ и могут быть определенны соответственно из единичных векторов $\mathbf{n}$ и $\boldsymbol{\delta}$ поворотом на угол φ вокруг оси Az', а единичный вектор $\mathbf{i}_3'$ лежит в плоскости $AZz' \equiv Az'D$, перпендикулярная линии узлов AN и угол между ним и единичным вектором $\mathbf{i}_3$ - θ. Таким образом не трудно установить следующее представление единичных векторов $\mathbf{i}_1', \mathbf{i}_2', \mathbf{i}_3'$:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_1' &= \mathbf{n}\cos\varphi + \boldsymbol{\delta}\sin\varphi \ , \\ \mathbf{i}_2' &= -\mathbf{n}\sin\varphi + \boldsymbol{\delta}\cos\varphi \ , \quad , \\ \mathbf{i}_3' &= \mathbf{i}_3\cos\theta - \mathbf{n}'\sin\theta , \end{aligned} \tag{15}$$

где $\mathbf{i}_3$ является единичным вектором неподвижной оси AZ. Для производных по времени единичных векторов $\mathbf{n}$ и $\mathbf{n}'$, которые поворачиваются вокруг оси AZ в неподвижной плоскости AXY, изменяя угол ψ, получаем:

$$\dot{\mathbf{n}} = \dot{\psi}\mathbf{n}' \quad , \quad \dot{\mathbf{n}}' = -\dot{\psi}\mathbf{n} .$$

Единичный вектор $\boldsymbol{\delta}$ лежит в плоскости AZN' и представлен в виде $\boldsymbol{\delta} = \mathbf{i}_3\sin\theta + \mathbf{n}'\cos\theta$. Отсюда, его производная по времени будет $\dot{\boldsymbol{\delta}} = \dot{\theta}\cos\theta.\mathbf{i}_3 - \dot{\theta}\sin\theta.\mathbf{n}' - \dot{\psi}\cos\theta.\mathbf{n}$, где $\dot{\mathbf{n}}' = -\dot{\psi}\mathbf{n}$. Имея в виду третье уравнение из (15), окончательно получаем:

$$\dot{\boldsymbol{\delta}} = \dot{\theta}.\mathbf{i}_3' - \dot{\psi}\cos\theta.\mathbf{n} .$$

Дифференцируя уравнение (15) по времени и учитывая полученные зависимости, приходим к соотношениям:

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{i}}'_1 &= -\dot{\varphi}\sin\varphi.\mathbf{n} + \dot{\psi}\cos\varphi.\mathbf{n}' + \dot{\varphi}\cos\varphi.\boldsymbol{\delta} + \sin\varphi\left(\dot{\theta}.\dot{\mathbf{i}}'_3 - \dot{\psi}\cos\theta.\mathbf{n}\right) = \\
&= \dot{\varphi}.\dot{\mathbf{i}}'_2 + \dot{\psi}\left(\cos\varphi.\mathbf{n}' - \sin\varphi\cos\theta.\mathbf{n}\right) + \dot{\theta}\sin\varphi.\dot{\mathbf{i}}'_3\ , \\
\dot{\mathbf{i}}'_2 &= -\dot{\varphi}\cos\varphi.\mathbf{n} - \dot{\psi}\sin\varphi.\mathbf{n}' - \dot{\varphi}\sin\varphi.\boldsymbol{\delta} + \cos\varphi\left(\dot{\theta}.\dot{\mathbf{i}}'_3 - \dot{\psi}\cos\theta.\mathbf{n}\right) = \\
&= -\dot{\varphi}.\dot{\mathbf{i}}'_1 - \dot{\psi}\left(\sin\varphi.\mathbf{n}' + \cos\varphi\cos\theta.\mathbf{n}\right) + \dot{\theta}\cos\varphi.\dot{\mathbf{i}}'_3\ , \\
\dot{\mathbf{i}}'_3 &= -\dot{\theta}\sin\theta.\mathbf{i}_3 - \dot{\theta}\cos\theta.\mathbf{n}' + \dot{\psi}\mathbf{sin}\theta.\mathbf{n} = -\dot{\theta}.\boldsymbol{\delta} + \dot{\psi}\sin\theta.\mathbf{n},
\end{aligned} \tag{16}$$

Проекции угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$ на подвижные оси системы $Ax'y'z'$ определяем замещая (15) и (16) в (6) и учитывая что: $\boldsymbol{\delta}.\mathbf{n} = 0, \mathbf{n}.\mathbf{n} = 1$, $\boldsymbol{\delta}.\boldsymbol{\delta} = 1, \mathbf{i}'_2.\mathbf{n} = -\sin\varphi, \mathbf{n}'.\mathbf{n} = 0, \mathbf{i}'_3.\mathbf{n} = 0, \mathbf{n}'.\boldsymbol{\delta} = \cos\theta, \mathbf{i}'_2.\boldsymbol{\delta} = \cos\varphi$. Получаем:

$$\begin{aligned}
\omega_{x'} &= -\dot{\mathbf{i}}'_3.\mathbf{i}'_2 = -\left(-\dot{\theta}.\boldsymbol{\delta} + \dot{\psi}\sin\theta.\mathbf{n}\right).\left(-\sin\varphi.\mathbf{n} + \cos\varphi.\boldsymbol{\delta}\right) = -\dot{\theta}\sin\varphi.\boldsymbol{\delta}.\mathbf{n} + \\
&+ \dot{\psi}\sin\theta\sin\varphi.\mathbf{n}.\mathbf{n} + \dot{\theta}\cos\varphi.\boldsymbol{\delta}.\boldsymbol{\delta} - \dot{\psi}\sin\theta\cos\varphi.\mathbf{n}.\boldsymbol{\delta} = \dot{\psi}\sin\varphi\sin\theta + \dot{\theta}\cos\varphi, \\
\omega_{y'} &= \dot{\mathbf{i}}'_3.\mathbf{i}'_1 = \left(-\dot{\theta}.\boldsymbol{\delta} + \dot{\psi}\sin\theta.\mathbf{n}\right).\left(\cos\varphi.\mathbf{n} + \sin\varphi.\boldsymbol{\delta}\right) = -\dot{\theta}\cos\varphi.\boldsymbol{\delta}.\mathbf{n} - \\
&- \dot{\theta}\sin\varphi.\boldsymbol{\delta}.\boldsymbol{\delta} + \dot{\psi}\sin\theta\cos\varphi.\mathbf{n}.\mathbf{n} + \dot{\psi}\sin\theta\sin\varphi.\mathbf{n}.\boldsymbol{\delta} = \dot{\psi}\sin\theta\cos\varphi - \dot{\theta}\sin\varphi, \\
\omega_{z'} &= \dot{\mathbf{i}}'_1.\mathbf{i}'_2 = \left[\dot{\varphi}\mathbf{i}'_2 + \dot{\psi}\left(\cos\varphi.\mathbf{n}' - \sin\varphi\cos\theta.\mathbf{n}\right) + \dot{\theta}\sin\varphi.\mathbf{i}'_3\right]\left(-\sin\varphi.\mathbf{n} + \cos\varphi.\boldsymbol{\delta}\right) = \\
&= -\dot{\varphi}\sin\varphi.\mathbf{i}'_2.\mathbf{n} - \dot{\psi}\cos\varphi.\mathbf{n}'.\mathbf{n} + \dot{\psi}\sin^2\varphi\cos\theta.\mathbf{n}.\mathbf{n} - \dot{\theta}\sin^2\varphi.\mathbf{i}'_3.\mathbf{n} + \\
&+ \dot{\varphi}\cos\varphi.\mathbf{i}'_2.\boldsymbol{\delta} + \dot{\psi}\cos^2\varphi.\mathbf{n}'.\boldsymbol{\delta} - \dot{\psi}\sin\varphi\cos\varphi\cos\theta.\mathbf{n}.\boldsymbol{\delta} + \dot{\theta}\sin\varphi\cos\varphi.\mathbf{i}'_3.\boldsymbol{\delta} = \\
&= \dot{\varphi}\left(\sin^2\varphi + \cos^2\varphi\right) + \dot{\psi}\left(\sin^2\varphi + \cos^2\varphi\right)\cos\theta = \dot{\varphi} + \dot{\psi}\cos\theta.
\end{aligned} \tag{17}$$

Полученные выражения (17) являются точно кинематическими уравнениями Эйлера относительно подвижных осей системы $Ax'y'z'$, неизменно связанных с телом.

- *Проекции угловой скорости на неподвижные оси системы* $Oxyz$.

Исходя непосредственно из формул (13), полученных после совершения инверсии движения и учитывая, что $\omega^*_X = -\omega_x, \omega^*_Y = -\omega_y, \omega^*_Z = -\omega_z$, подходящим образом выражаем соответствующие единичные вектора и их производные по времени через углы Эйлера. Получаем:

$$\begin{aligned}
\mathbf{i}_1 &= \mathbf{n}.\cos\psi - \mathbf{n}'.\sin\psi\ , \\
\mathbf{i}_2 &= \mathbf{n}.\sin\psi + \mathbf{n}'.\cos\psi\ , \\
\mathbf{i}_3 &= \mathbf{i}'_3.\cos\theta + \boldsymbol{\delta}.\sin\theta,
\end{aligned} \tag{18}$$

где $\mathbf{i}'_3$ является единичным вектором оси Az', трансформированным при инверсии в неподвижную. Производные по времени единичных векторов $\mathbf{n}$ и $\boldsymbol{\delta}$, которые поворачиваются вокруг оси Az' в плоскости $Ax'y'$, описывая угол $-\varphi$, будут:

$$\dot{\mathbf{n}} = -\dot{\varphi}.\boldsymbol{\delta}\ \ , \quad \dot{\boldsymbol{\delta}} = \dot{\varphi}.\mathbf{n}\ .$$

Единичный вектор $\mathbf{n}'$ лежит в плоскости $Az'D \equiv AZz'$ и представляется в виде $\mathbf{n}' = -\mathbf{i}'_3.\sin\theta + \boldsymbol{\delta}.\cos\theta$. После дифференцирования по времени, нахо-

дим $\dot{\mathbf{n}}' = -\dot{\theta}\cos\theta.\mathbf{i}_3' - \dot{\theta}\sin\theta.\boldsymbol{\delta} + \dot{\varphi}\cos\theta.\mathbf{n}$. Отсюда, на основе третьего уравнения из (18), имеем:

$$\dot{\mathbf{n}}' = -\dot{\theta}.\mathbf{i}_3' + \dot{\varphi}\cos\theta.\mathbf{n}.$$

Производные по времени единичных векторов $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$, на основании (18) и учитывая полученные зависимости, получаем в виде:

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{i}}_1 &= -\dot{\psi}\sin\psi.\mathbf{n} - \dot{\varphi}\cos\psi.\boldsymbol{\delta} - \dot{\psi}\cos\psi.\dot{\mathbf{n}}' - \sin\psi\left(-\dot{\theta}.\mathbf{i}_3 + \dot{\varphi}\cos\theta.\mathbf{n}\right) = \\
&= -\dot{\psi}.\mathbf{i}_2 - \dot{\varphi}\left(\cos\psi.\boldsymbol{\delta} + \sin\psi\cos\theta.\mathbf{n}\right) + \dot{\theta}\sin\psi.\mathbf{i}_3, \\
\dot{\mathbf{i}}_2 &= \dot{\psi}\cos\psi.\mathbf{n} - \dot{\varphi}\sin\psi.\boldsymbol{\delta} - \dot{\psi}\sin\psi.\dot{\mathbf{n}}' + \cos\psi\left(-\dot{\theta}.\mathbf{i}_3 + \dot{\varphi}\cos\theta.\mathbf{n}\right) = \\
&= \dot{\psi}.\mathbf{i}_1 - \dot{\varphi}\left(\sin\psi.\boldsymbol{\delta} - \cos\psi\cos\theta.\mathbf{n}\right) - \dot{\theta}\cos\psi.\mathbf{i}_3. \\
\dot{\mathbf{i}}_3 &= -\dot{\theta}\sin\theta.\mathbf{i}_3' + \dot{\theta}\cos\theta.\boldsymbol{\delta} + \dot{\varphi}\sin\theta.\mathbf{n} = \dot{\theta}.\dot{\mathbf{n}}' + \dot{\varphi}\sin\theta.\mathbf{n},
\end{aligned} \tag{19}$$

Проекции вектора угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$ на неподвижные оси системы $Oxyz$ определяем через формулы (13). Находим:

$$\begin{aligned}
\omega_X^* &= -\dot{\mathbf{i}}_3.\mathbf{i}_2 = -\left(\dot{\theta}\mathbf{n}' + \dot{\varphi}\sin\theta.\mathbf{n}\right)\left(\mathbf{n}\sin\psi + \mathbf{n}'\cos\psi\right) = -\left(\dot{\varphi}\sin\psi\sin\theta + \dot{\theta}\cos\psi\right), \\
\omega_Y^* &= \dot{\mathbf{i}}_3.\mathbf{i}_1 = \left(\dot{\theta}\mathbf{n}' + \dot{\varphi}\sin\theta.\mathbf{n}\right)\left(\mathbf{n}\cos\psi - \mathbf{n}'\sin\psi\right) = -\left(-\dot{\varphi}\cos\psi\sin\theta + \dot{\theta}\sin\psi\right), \\
\omega_Z^* &= \dot{\mathbf{i}}_1.\mathbf{i}_2 = \left[-\dot{\psi}\mathbf{i}_2 - \dot{\varphi}\left(\cos\psi\,\boldsymbol{\delta} + \sin\psi\cos\theta\,\mathbf{n}\right) + \dot{\theta}\sin\psi\,\mathbf{i}_3\right]\times\left(\mathbf{n}\sin\psi + \mathbf{n}'\cos\psi\right) = \\
&= -\dot{\psi}\left(\sin^2\psi + \cos^2\psi\right) - \dot{\varphi}\cos\theta\left(\sin^2\psi + \cos^2\psi\right) = -\left(\dot{\psi} + \dot{\varphi}\cos\theta\right),
\end{aligned} \tag{20}$$

где учтено, что $\omega_X^* = b_{23}$, $\omega_Y^* = b_{31}$, $\omega_Z^* = b_{12}$. Имея в виду, что $\omega_X^* = -\omega_x, \omega_Y^* = -\omega_y, \omega_Z^* = -\omega_z$, полученные соотношения являются точно кинематическими уравнениями Эйлера для неподвижных осей системы $Oxyz$.

В работе рассматривается наиболее общее движение идеально твердого тела и представлен один метод для определения кинематических уравнений Эйлера, используя методов инверсии и скалярных произведений единичных векторов и их производных относительно трех подходяще выбранных осей, аналогично единичным векторам, использованных в равнинном движении твердого тела. Доказано твердение, что угловая скорость инверсного движения равняется и противоположна угловой скорости прямого движения.

Представленный метод дополняет известные в теории методов и дает новое представление этого движения, что позволяет его использование в теории механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апель П. Теоретическая механика. – Ч.I. – М.: Физматгиз, 1960. – 515 с.
2. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. – Ч.I. – М.: Наука, 1965. – 467 с.

3. Бъчваров С. Механика. – Ч.I. – С.: Стандартизация принт, 2001. – 391 с.
4. С.Н.Бъчваров, А.А.Джонджоров. Върху разпределението на скоростите на точките на твърдо тяло при най-общ случай на движение// Годишник на МЕИ-София. – 1961. – Т.X –№I – С.147-152.
5. Елисеев В. В. Механика упругих тел. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 340с.
6. Зоммерфельд А. Механика. – М.: РХД, 2001. – 368 с.
7. Лойцянский Л.Г. Лурье А.И. Курс теоретической механики. – Ч.I. – М.: Наука, 1982. – 352с.
8. Лурье А.И. Аналитическая механика. – М.: Физматгиз, 1961. – 824 с.
9. Писарев А., Парасков Ц., Бъчваров С. Курс по теоретична механика. – Ч.I. – С.: Техника, 1974. – 427 с.
10. Синг Дж.Л. Классическая механика. – М.: Физматгиз, 1963. – 448 с.
11. Стоянов А. Теоретична механика. – Ч.II. Кинематика и динамика. – С.: Техника, 1964.
12. Суслов Г.К. Теоретическая механика. – М.: Гостехиздат, 1946. – 667с.
13. Уитикер Э.Т. Аналитическая динамика. – М.: 2004. – 586 с.
14. Харламов П.В.. О распределении скоростей в твердом теле. Республиканский межведомственный сборник “Механика твердого тела”. – К.: Наукова думка, 1969. – С.77-81.

УДК 622.7

Л.А. Вайсберг, А.В. Акимова, К.С. Иванов

НОВЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ВИБРАЦИОННЫХ ГРОХОТОВ И ГРОХОТОВ-СЕПАРАТОРОВ



Кирилл Сергеевич Иванов, научный сотрудник,
НПК «Механобр-техника»
Россия, 199106, Санкт-Петербург, В.О., 22-линия, дом 3, корп. 5
Тел.:(812)331 02 54, Ivanoff.k.s@gmail.com



Анастасия Викторовна Акимова, инженер-эколог, аспирант
НПК «Механобр-техника»
Россия, 199106, Санкт-Петербург, В.О., 22-линия, дом 3, корп. 5
Тел.:(812)331 02 54, (812)331 02 57 Akimova_av@npk-mt.spb.ru



Леонид Абрамович Вайсберг,
Член-корреспондент РАН, профессор, заслуженный строитель РФ
НПК «Механобр-техника»
Россия, 199106, Санкт-Петербург, В.О., 22-линия, дом 3, корп. 5
Тел.:(812)331 02 50 gornyi@mtspb.com

Аннотация

Излагаются результаты разработки быстро действующего вычислительного алгоритма моделирования и расчета аппаратов для вибрационной классификации по крупности руд, твердых отходов и других сыпучих материалов. Показано, что адаптация нескольких аналитических моделей к компьютерным вычислениям позволяет создать новый подход, отличающийся меньшей ресурсоемкостью по сравнению с распространенными универсальными подходами (включая DEM). Основанный на проблемно-ориентированных методиках, данный алгоритм не нуждается в предварительной калибровке и уточнении параметров, что также снижает время и затраты на его применение.

Алгоритм допускает поэлементное совершенствование, что проиллюстрировано с помощью внедрения продвинутой модели прохождения частиц через отверстия сита и подмоделью вибрационной сепарации частиц в слое.

Ключевые слова: грохочение, сегрегация, численное моделирование, сепарация.

K.S. Ivanov[1], L.A. Vaisberg[1], A.V. Akimova[1]

NEW METHODS OF MODELLING AND CALCULATION VIBRATING SCREEN SEPARATORS

[1]Research & Engineering Corporation Mekhanobr Tekhnika

Abstract

The work is revealing authors' experience in developing of computational resource-effective algorithm for modeling of vibrational screen separation of granular materials.

It is shown that numerical interpretation of several analytical models could lead to a new approach which is not as resource-intensive as widespread multifunctional computational methods (including DEM) are. Being based on the problem-oriented classical models the algorithm presented here appears to demand for little deployment time compared with universal approaches for it doesn't require vast calibration and adjustment procedures to precede its application.

The algorithm allows parcelwise improvements which were illustrated with advanced openings passing and vibrational separation submodels.

Key words: screening, separation, numerical modeling

Вибрационное грохочение – широко распространенный метод классификации сыпучих материалов по крупности. Характер протекания этого процесса в рамках открытых и, особенно, замкнутых циклов дробления оказывает существенное влияние на энергоэффективность дезинтеграции. При переработке нерудных полезных ископаемых и угля вибрационное грохочение обеспечивает товарное качество конечных продуктов. Классификация по крупности твердых бытовых отходов также является важнейшей операцией подготовки материала к дальнейшей переработке.

За всю многолетнюю историю применения грохотов было выработано три принципиально разных типа подходов к рассчету соответствующих устройств. Первые подходы – эмпирические, базировались на прямом обобщении имеющегося опыта и несложных формулах с экспериментальными коэффициентами, вторые – феноменологические, строились на гипотезах о той или иной структуре процесса, называемой часто, кинтетикой грохочения, а третьи – численные, сформировались в конце прошлого века, когда мощности вычислительных машин позволили проводить детальное моделирование физических процессов с заданной механикой.

Метод дискретных элементов [1] и другие распространенные сейчас

универсальные подходы к моделированию поведению сыпучей среды, применяемые для изучения процесса вибрационного грохочения, отличаются крайне высокой ресурсоемкостью вычислений. Детализированные численные эксперименты могут затянуться на месяцы, что нивелирует преимущества компьютерного эксперимента перед натурным. Таким образом, развитие и совершенствование известных аналитических методик может способствовать заметному упрощению процесса разработки нового оборудования. Более того, совместно с применением современных методов численной оптимизации, таких как, например, метод роя частиц [2], подобные усовершенствованные подходы позволят проводить поиск оптимальных конструктивных и технологических параметров устройств для ситовой классификации в автоматическом режиме.

Системный подход, предложенный в институте Механобр и наиболее полно представленный в работе [3], был разработан для моделирования процесса грохочения толстого слоя крупнокускового сыпучего материала, транспортируемого по просеивающей поверхности с постоянной в среднем скоростью. Авторы [3] получили наиболее общее дифференциальное соотношение, определяющее кинетику процесса грохочения:

$$\frac{d\varepsilon_D}{dy} = \frac{u\varphi}{v}\left(1 - \frac{D}{d_0}\right)^2 P_{D,y}(0)(1 - \varepsilon_D),$$

где ε_D – извлечение в подрешетный продукт узкого класса D, v – скорость движения слоя материала по ситу, u – скорость прохождения частиц через отверстия просеивающей поверхности, d_0 – диаметр отверстий сита, а $P_{D,y}(0)$ – доля частиц диаметра D в рассматриваемой области контакта. Если считать материал в слое равномерно перемешанным, это соотношение принимает вид центрального дифференциального уравнения из классической модели [4]. В случае же абсолютной сегрегации и линейной кумулятивной характеристики крупности материала, соотношение (2) интегрируется аналитически, сводясь, при этом, к равенству

$$\gamma = \frac{\beta y}{y + \frac{Q_0\beta}{u\varphi ac}},$$

совпадающему с полученным экспериментально в работе [5]. Здесь γ – выход материала в подрешетный продукт, β – параметр, характеризующий наклон кумулятивной характеристики крупности, Q_0 – производительность по питанию, c – насыпная плотность материала. Следует подчеркнуть, что по сравнению с большинством распространенных сейчас численных подходов к моделированию поведения сыпучей среды, этот метод отличается крайне низкой вычислительной ресурсоемкостью.

Представленный ниже усовершенствованный подход к моделированию процесса грохочения крупнокускового сыпучего материала создан на основе богатого опыта НПК «Механобр-техника» в разработке и производстве вибрационных грохотов. На входе составленная с помощью этого подхода программа принимает следующие параметры: гранулометрический состав материала, представленного в виде смеси с заданными пропорциями узких классов крупности введенных пользователем диаметров (d_i), а также коэффициенты трения частиц материала между собой и с просеивающей поверхностью; производительность грохота по питанию (Q_0); параметры сита, такие как длина (l), ширина (a), диаметр отверстий (d_0) и живое сечение (φ); характеристики колебаний грохота (можно отдельно задать горизонтальные и вертикальные компоненты в произвольном виде) или, как в исходной модели, скорость вибрационного перемещения слоя материала по поверхности сита (v); скорость движения частиц материала через отверстия сита (может быть выбрана из специальной таблицы экспериментальных данных). На выходе же программа позволяет получить извлечения для всех заданных узких классов, распределения частиц этих классов в толщине слоя материала на всей длине просеивающей поверхности, а также все производные характеристики, такие как эффективность извлечения выбранного класса или набора классов, выходы продуктов и прочие.

Так как дифференциальное соотношение базовой модели в общем случае не интегрируемо аналитически, усовершенствованный подход изначально формулировался в виде, удобном для компьютерных вычислений. Слой материала на просеивающей поверхности был представлен в виде набора пространственных ячеек (см. рис. 2).

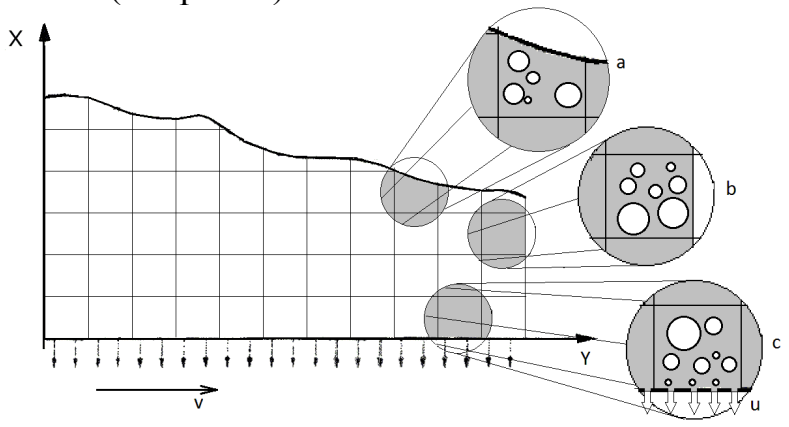


Рис. 2. Продольное сечение слоя материала на грохоте, разбиение на ячейки
a) ячейка поверхностного слоя, b) ячейка из толщи материала, c) ячейка из области контакта материала и сита

Для каждой ячейки (с номером j по высоте снизу из столбца с номером k, считая от питателя) заданы следующие параметры: $F_{k,j}(d_i)$ – массовая доля узкого класса d_i в этой ячейке, $M_{k,j}$ – полная масса всего материала в ячейке. Разбиение материала на ячейки, удобное для численного рассмотрения, попутно позволило придать архитектуре программы модульный характер. Основу подхода составляют три относительно независимых подмодели: перемещения, просеивания и перераспределения частиц внутри слоя материала. Ориентируясь на поставленные цели и задачи моделирования, пользователь может изменить каждую из частных моделей и соответствующих подпрограмм, чтобы достигнуть разумного соотношения ресурсоемкости и точности вычислений, или даже использовать новую подпрограмму, составленную по другой модели, без изменения остального кода.

Вибрационное перемещение входило в базовую модель (см. (2)) исключительно как параметр v – скорость движения слоя материала по просеивающей поверхности грохота. То есть связь между параметрами вибрации и характером скольжения материала по просеивающей поверхности учитывалась лишь косвенным образом, что в ряде случаев может быть неудобно при инженерных расчетах. Для рассмотрения задачи в общей постановке была составлена подпрограмма, моделирующая вибрационное перемещение твердого тела по вибрирующей наклонной шероховатой плоскости. В основу программы легли методы, представленные в работе [6]. Средняя скорость такого перемещения принималась за скорость движения слоя материала в аналогичных условиях.

В соответствии с базовой моделью, массовый отток через сегмент сита с номером k для каждого класса можно рассчитать по формуле:

$$q_k(d_i) = P(d_i)uF_{k,0}(d_i)\Delta ya,$$

где $P(d_i)$ – коэффициент, задающий долю частиц с диаметром d_i, находящихся на просеивающей поверхности, которая пройдет через отверстия сита, и условно называющийся вероятностью прохождения частицы узкого класса, u, $F_{k,0}(d_i)$, Δy и a, соответствуют скорости прохождения материала через отверстия сита, массовым долям различных классов в ячейках сыпучей среды, горизонтальному размеру ячеек и ширине просеивающей поверхности, соответственно.

Исходная модель, подобно большей части предшествовавших ей аналитических подходов, базировалась на годеновской вероятности прохождения. Однако в классической формуле Годена не учтена возможности одновременного прохождения нескольких частиц одного или разных классов крупности через отверстие просеивающей поверхности, таким образом, интенсивность просеивания мелких классов может быть несколько занижена. Модель, пред-

ставленная в настоящей статье, была уточнена с использованием усовершенствованной формулы А.Е. Пелевина [7]. Если обозначить годеновскую вероятность для частицы диаметра d_i

$$P^{d_0}(d_i) = \varphi\left(1 - \frac{d_i}{d_0}\right)^2,$$

то можно записать уточненную вероятность Пелевина в компактном виде:

$$P(d_i) = P^{d_0}(d_i) + \sum_{j,(d_j+d_i \le d_0)} F_{k,0}(d_j) P^{d_0}(d_j) P^{d_0-d_j}(d_i).$$

здесь члены под знаком суммы соответствуют условным вероятностям прохождения частицы диаметра d_i при прохождении частиц диаметра d_j в оставшийся зазор размера $d_0 - d_j$ для всех j, для которых $d_j + d_i \le d_0$.

Процессы, происходящие в толще слоя материала во время его вибрационного транспортирования, могут оказывать существенное влияние на протекание ситовой классификации, поскольку определяют – какие частицы будут контактировать с просеивающей поверхностью. Способам описания и учета этих процессов при моделировании вибрационного грохочения уделено внимание во многих работах [4, 8, 9]. При этом специфика построения модели, представленной в настоящей статье, позволяет гибко воплощать практически любые идеи, касающиеся моделирования поведения частиц в слое материала. В первоначальной версии представляемой модели процесс сегрегации учитывался как протекающий равномерно с помощью принудительного усреднения с заданной пропорциональностью функции распределения классов по высоте сечения с функцией, соответствующей полностью отсортированному распределению. Описанный выше способ учета вибрационной сегрегации обладает, однако, выраженным недостатком – существенно неоднородные материалы при таком моделировании сортируются с той же скоростью, что и практически однородные. По этой причине в алгоритм была введена уточненная модель, в рамках которой сегрегация представлялась как часть процесса обмена материалом между вычислительными ячейками – мелкие классы просеиваются сквозь слой крупных, как сквозь сито.

При уточненном моделировании сегрегации нижняя граница каждой ячейки представляла собой условную просеивающую поверхность с диаметром отверстия, взятым как зазор между упакованными частицами среднего для этой ячейки радиуса. Мелкие классы получают дополнительное преимущество в доступе к просеивающей поверхности, что делает кривые извлечения более реалистичными. В таблице 1 представлены сравнительные результаты натурных экспериментов и моделирования в трех вариантах – исходном, с усовершенствованным просеиванием и усовершенствованной сегрегацией. Представленные на рис. 4 кривые извлечения для натурного и численного мо-

делирования исходным и усовершенствованным методами, соответствуют первому эксперименту таблицы.

Таблица 1. Сравнение результатов натурного и численного моделирования представленными подходами

					Извлечения			
	Классы крупности исходного материала (мм)	Содержания для классов крупности (%)	Массовая производи-тельность грохота (т/ч)	Размер ячейки сита (мм)	данные эксперимента	исходная модель	усов. просеивание	усов. сегргеация
1	-0,071+0	1,67	1,76	0,630	0,83	0,97	0,96	0,98
	-0,18+0,071	11,41			0,91	0,97	0,96	0,95
	-0,315+0,18	8,58			0,88	0,97	0,95	0,86
	-0,63+0,315	16,74			0,53	0,84	0,82	0,61
	+0,63	61,61			0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,071+0	1,26	0,63	0,630	1,00	0,98	0,97	0,99
	-0,18+0,071	11,12			1,00	0,98	0,97	0,97
	-0,315+0,18	8,84			1,00	0,98	0,97	0,90
	-0,63+0,315	17,12			0,69	0,95	0,93	0,72
	+0,63	61,66			0,00	0,00	0,00	0,00
3	-0,071+0	1,24	0,54	0,315	1,00	0,97	0,95	0,96
	-0,18+0,071	11,17			0,99	0,96	0,95	0,90
	-0,315+0,18	10,30			0,74	0,93	0,90	0,75
	-0,63+0,315	16,56			0,00	0,00	0,00	0,00
	+0,63	60,73			0,00	0,00	0,00	0,00
4	-0,071+0	1,53	1,73	0,315	0,89	0,96	0,94	0,95
	-0,18+0,071	11,98			0,87	0,95	0,93	0,88
	-0,315+0,18	8,59			0,61	0,77	0,74	0,61
	-0,63+0,315	17,02			0,00	0,00	0,00	0,00
	+0,63	60,87			0,00	0,00	0,00	0,00

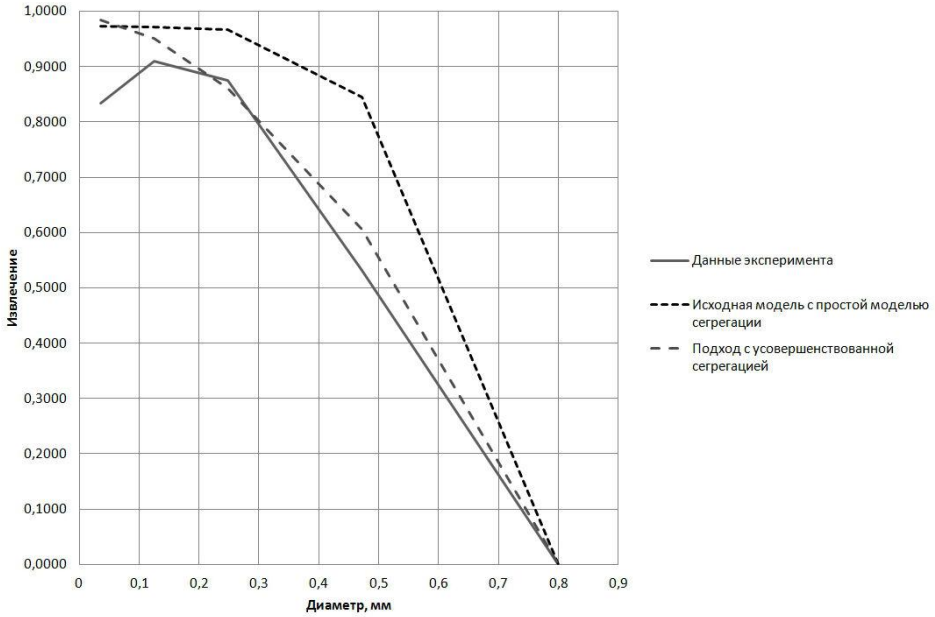


Рис. 4. Кривые извлечения по классам крупности для эксперимента 1

Подход к моделированию процесса вибрационного грохочения, представленный в настоящей статье, обладает рядом преимуществ по сравнению как с современными численными, так и распространенными аналитическими методами. Он позволяет проводить моделирование с высокой точностью без длительной настройки, калибровки и предварительных экспериментальной подготовки, при этом подходит для рассмотрения широкого модельного ряда устройств. На основе представленного подхода составлена компьютерная программа с дружественным пользовательским интерфейсом, дающая конструкторам возможность по исходным параметрам оценить работу проектируемого устройства. Низкая ресурсоемкость вычислений по программе позволила применять ее совместно с методами стохастической оптимизации для предварительной оценки оптимальных параметров разрабатываемых грохотов и грохотов-сепараторов.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Федеральной целевой программы, гранты 14.U02.21.0681 и 12-05-31376.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P.A. Cundall, O.D.L. Strack, A distinct element model for granular assemblies. Geotechnique, 29, 1979, pp. 47—65.
2. T-H. Kim, I. Maruta, T. Sugie, A simple and efficient constrained particle swarm optimization and its application to engineering design problems, Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, vol 224, No C2, pp. 389-400
3. Вайсберг Л.А., Рубисов Д.Г.: Вибрационное грохочение сыпучих материалов. Механобр, 1994, 47 с.
4. Ferrara G., Preti U., Schena G.D. Modelling of screening operations. Intern. J. of Mineral Processing. 22, 1-4, 1988, pp. 193-222
5. Абрамович И.М. Некоторые закономерности процесса грохочения. XV лет на службе соц. строительства: Юбилейный сб. «Механобр». Л.-М.: ГРГТЛ, 1935. С. 367-410.
6. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение, Москва, Наука, 1964, 410 с.
7. Пелевин А.Е. Вероятность прохождения частиц через сито и процесс сегрегации на вибрационном грохоте // Известия вузов. Горный журнал. – 2011. – № 1. – С. 119-129.
8. Subasinghe G.K.N.S., Schaap W., Kelly E.G. Modelling screening as a conjugate rate process. International Journal of Mineral Processing. 1990. V 28, I. 3–4. pp. 289–300.

УДК 621.01

В. П. Верховод

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ ПЛОСКИХ МЕХАНИЗМОВ В СИСТЕМЕ GEOGEBRA



Владимир Павлович Верховод, инженер-конструктор
ОАО ВСЗ
Россия, Выборг
Тел.: (812)201-44, E-mail: VerhovodVP@vsy.ru.

Аннотация

В статье показано использование программы GeoGebra в изучении кинематической геометрии плоских механизмов. Для иллюстрации технического применения кинематической геометрии рассмотрен синтез кривошипно-коромыслового четырехзвенника по трем положениям шатуна.

Ключевые слова: кинематическая геометрия, синтез плоских механизмов, кривошипно-коромысловый четырехзвенник.

V.P.Verhovod

STUDY OF KINEMATIC GEOMETRY PLANE MECHANISMS IN GEOGEBRA

Vladimir P. Verhovod, Vyborg, Shipyard, Russia,
e-mail: VerhovodVP@vsy.ru

Abstract

The article shows how to use GeoGebra program to study the kinematic geometry of planar mechanisms. To illustrate the technical application of the kinematic geometry of the considered synthesis of crank rocker four-bar linkage mechanism on the three positions of the coupler link.

Key words: kinematic geometry, synthesis of planar mechanisms, crank rocker four-bar linkage.

1. Введение

В настоящее время моделирование в различных его видах является основой для проведения исследований практически во всех областях науки и техники. В теории машин и механизмов важное значение имеет геометрическое моделирование, которое, используя достижения вычислительной

техники, дает возможность применения графических и графо-аналитических методов решения задач ТММ на новом современном уровне.

Среди программных систем, реализующих на практике методы геометрического моделирования, в последнее время начинает приобретать популярность интерактивное программное обеспечение с использованием средств динамического моделирования. Основу таких средств составляют такие понятия как “геометрический процесс” и “геометрический оператор”.

Имеется множество интерактивных геометрических систем, как коммерческих так и бесплатных, свободно распространяемых. Среди последних особой популярностью пользуется система GeoGebra, работающая на большом числе операционных систем и переведенная на многие языки. Geogebra полностью поддерживает русский язык

Получить основные сведения о системе GeoGebra можно на сайте http://www.geogebra.org/ и по статье [8].

Система GeoGebra может оказать существенную помощь в решении многих геометрических задач и в изучении сложных разделов геометрии. Это достигается путем наглядных операций с геометрическими объектами, пошаговом решении задачи, просмотра решения задачи с самого начала, анимации и т.п. Анимация и визуализация кинематических схем рассматривалась в журнале [7]. Большим достоинством системы GeoGebra является возможность анимации геометрических объектов фактически без программирования. Анимация в GeoGebra выполняется даже проще чем в программах Excel и MathCad.

В данной статье будет показано применение интерактивных геометрических методов в системе Geogebra для решения задач кинематической геометрии плоских механизмов.

Кинематическая геометрия может быть отнесена к одним из наиболее трудных в изучении прикладных разделов геометрии. Основы кинематической геометрии плоских механизмов были заложены в исследованиях немецкого ученого Л. Бурместера (1840-1927)

В работе [1] Бурместер поставил и решил следующую задачу: заданы пять произвольных положений плоской фигуры S, требуется найти на фигуре такую точку A, чтобы пять соответствующих ее положений A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 находились на одной окружности. Бурместер показал, что таких точек существует четыре – A, B, C, D и что они определяются пересечением

двух особого рода (фокальных) циркулярных кривых третьего порядка. Эти точки и кривые получили название точек и кривых Бурместера.

Кинематическая геометрия плоских механизмов одновременно с Бурместером развивалась также А. Шенфлисом (1853-1928). В его классическом труде [2] содержится не только теория движущейся плоскости но и заложены основы сферической кинематической геометрии.

В этой статье мы не будем касаться сложных вопросов кинематической геометрии и ограничимся рассмотрением и решением самых простых задач. Для иллюстрации технического применения кинематической геометрии плоских механизмов будет рассмотрен синтез четырехзвенника по трем положениям шатуна.

В начале статьи кратко остановимся на основных принципах кинематической геометрии плоскопараллельного перемещения плоской фигуры (звена механизма) [3,4,5].

2. Два и три положения подвижной плоскости

Различают соседние (т.е. находящиеся на конечном расстоянии) и бесконечно близкие положения звена механизма (плоской фигуры). Начнем со случая двух соседних положений звена механизма. Далее перейдем к геометрии трех положений, изучение которых часто оказывается достаточным для решения практических задач. На рисунке 1 показаны плоская фигура S и связанное с ней звено механизма AB в двух соседних произвольных положениях.

Перемещение фигуры из положения S_1 в положение S_2 можно получить поворотом на угол ϕ_{12} с центром вращения в точке P_{12}. Это так называемый полюс конечного перемещения. На рисунке также показаны оси симметрии a_{12} и b_{12}. Эти оси перпендикулярны отрезкам A_1A_2 и B_1B_2 и делят их пополам. Полюс P_{12} и угол поворота ϕ_{12} вполне определяют два положения плоской фигуры.

В случае когда два соседних положения звена механизма параллельны друг другу полюс P_{12} лежит в пересечении параллельных друг другу a_{12} и b_{12}, т.е. у ходит в бесконечность. В этом случае переход из положения S_1 в положение S_2 можно получить поступательным перемещением.

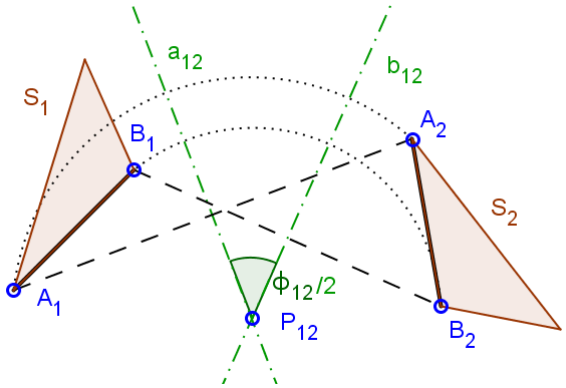


Рис. 1. Два положения звена механизма с полюсом перемещения

Рассмотрим теперь три произвольных соседних положения плоской фигуры - S_1, S_2 и S_3. Плоская фигура будет изображать звено механизма AB в трех положениях - A_1B_1 , A_2B_2 и A_3B_3. Перемещение фигуры из положения S_1 в положение S_2 можно получить поворотом с центром вращения в точке P_{12}, из положения S_2 в положение S_3 - поворотом с центром вращения в точке P_{23} и из положения S_1 в положение S_3 – поворотом с центром вращения в точке P_{13}. Точки P_{12}, P_{23}, и P_{13} – полюса, а треугольник построенный на этих точках – полюсный треугольник. На рисунке также показаны некоторые оси симметрии, например оси a_{23} и b_{23} перпендикулярны отрезкам A_2A_3 и B_2B_3 и делят их пополам.

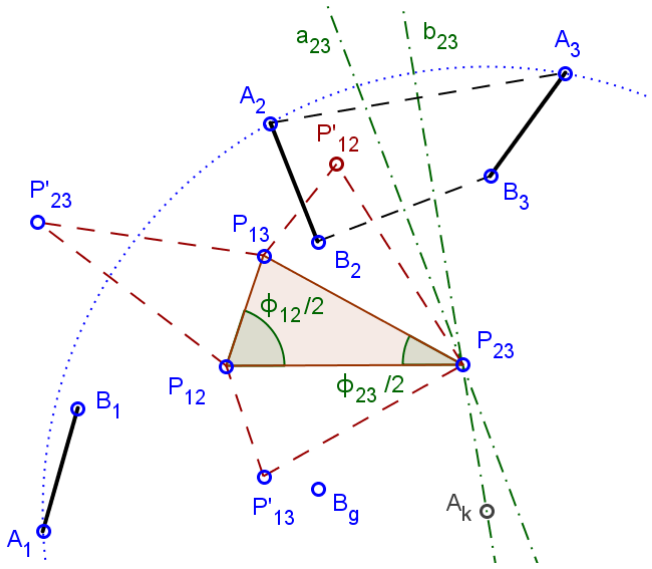


Рис. 2. Три положения звена механизма с полюсным треугольником

Полюс P_{23} находится на пересечении данных осей симметрии. Аналогичным образом находятся положения полюсов P_{12} и P_{13} На рисунке также показаны углы $\phi_{12}/2$ и $\phi_{23}/2$ при вершинах полюсного треугольника.

Эти углы, как и не показанный на рисунке угол $\phi_{13}/2$, связаны простой зависимостью с углами поворота фигуры из одного положения в другое.

Для полюсного треугольника справедлива следующая теорема.

Теорема о полюсном треугольнике. *Внутренние и, соответственно, внешние углы полюсного треугольника для трех соседних положений плоской фигуры равны половинам соответствующих углов вращения:*

$$\angle P_{13}P_{12}P_{23} = \frac{\phi_{12}}{2}; \angle P_{12}P_{13}P_{23} = \frac{\phi_{13}}{2}; \angle P_{12}P_{23}P_{13} = \frac{\phi_{23}}{2}$$

Приведем теперь несколько простых примеров, иллюстрирующих некоторые важные свойства полюсного треугольника.

Пример 1. Задан полюсный треугольник, по выбранной точке A_1 в S_1 установить ее положения A_2 в S_2 и A_3 в S_3. Для этого, согласно теоремы о полюсном треугольнике, достаточно точку A_1 переместить вокруг полюсов P_{12} и P_{13} на углы ϕ_{12} и ϕ_{13}. Эти углы равны удвоенным значениям углов полюсного треугольника при вершинах P_{12} и P_{13}. Такое построение можно выполнить несколькими способами. Выбран следующий способ:

- находим зеркальное отражение точки A_1 относительно стороны $P_{12}P_{13}$ полюсного треугольника, получаем так называемую основную точку A_g
- отражая основную точку A_g относительно других сторон полюсного треугольника получаем точки A_2 и A_3

Чтобы выполнить необходимые геометрические построения, в командной строке GeoGebra введем следующие команды:

- задаем произвольно координаты точек полюсного треугольника
  P_{12}=(0, 0)
  P_{23}=(3, 0)
  P_{13}=(1, 2)
- по данным точкам строим полюсный треугольник
  Polygon[P_{12}, P_{13},P_{23}]
- произвольно задаем координаты точки A_1 в положении S_1
  A_1=(-0.5, 1.5)
- находим точку A_g путем зеркального отражения точки A_1
  A_g =Reflect [A_1, p_{23}]
- находим точки A_2 и A_3 в положениях S_2 и S_3

  A_2 =Reflect[A_g, p_{13}]
  A_3 =Reflect[A_g, p_{12}]

- через три точки A_1, A_2 и A_3 проводим окружность
  Circle(A_1,A_2,A_3)
- находим центр окружности - точку A_k
  A_k=Center[c]

Результаты данного построения, после редактирования свойств объектов (цвета и стиля точек и линий) представлены на рис. 3.

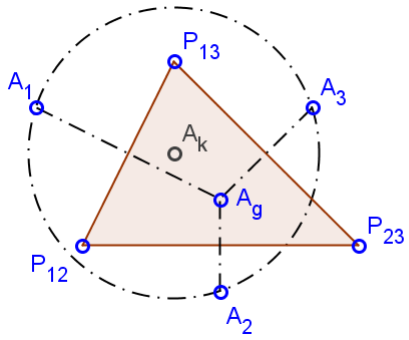


Рис. 3. По заданному полюсному треугольнику определение трех положений точки A

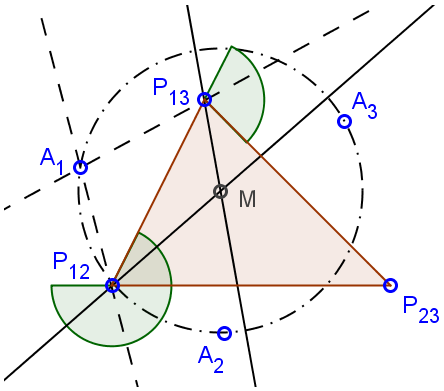


Рис. 4. Построение точки A_1 и по ней точек A_2 , A_3 если задан полюсный треугольник и центр M.

Из приведенного примера видно, что каждой точке подвижной плоскости соответствует единственная точка неподвижной в качестве центра вращения, переводящего подвижную точку через три заданных положения. И обратно, каждой точке неподвижной плоскости, как центра вращения, будет соответствовать единственная точка подвижной плоскости, переходящая через три заданных положения при вращении вокруг этого центра.

Следующий пример геометрического построения сделает более ясным данное утверждение.

Пример 2. Полюсным треугольником задано три положения плоской фигуры S. На неподвижной плоскости задана точка M. Найти на подвижной плоскости такую точку A, чтобы через три соответствующих ее положения A_1 A_2 и A_3 можно было провести окружность с центром в точке M. (задача Бурместера для трех положений плоской фигуры).

Чтобы найти точки A_1 A_2 и A_3 , достаточно вначале найти одну точку A_1 а затем выполнить построение уже описанное в примере 1. Точку A_1 можно найти следующим образом. Проведем через точку M и полюса P_{12},

P_{13} прямые $M\,P_{12}$ и $M\,P_{13}$. Повернув эти прямые вокруг полюсов P_{12} и P_{13} на углы $-\phi_{12}/2$ и $-\phi_{13}/2$, получим в пересечении прямых точку A_1.

Поворот прямых выполним с помощью следующих команд :

```
Θ1=Angle[p_{13},p_{23}]
Rotate[a,Θ1,P_{12}]
Θ2=Angle[p_{12},p_{23}]
Rotate[b,Θ2,P_{13}]
```

В пересечении повернутых прямых находим точку A_1:

```
A_1=Intersect[a', b']
```

Точки A_2 и A_3 находим аналогично предыдущему примеру.

На рис. 4 показан результат данного построения.

3. Синтез четырехзвенника по трем положениям шатуна

В качестве примера применения геометрических методов рассмотрим синтез транспортирующего механизма, входящего в состав линии обработки деталей [6]. Схема механизма, представляющего собой шарнирный четырехзвенник, изображена на рис.5. На транспортирующий механизм возлагается выполнение следующих операций: снять деталь с направляющих, повернуть ее на 90° и опять положить.. Этим самым задается два положения A_1B_1 и A_2B_2 грейфера. Дополнительное положение A_3B_3 задается, чтобы грейфер из положения A_2B_2 в положение A_1B_1 переходил, не касаясь той детали, которую он переместил в новое положение

Для выполнение этих операций не требуется точных расчетов шатунной кривой, достаточно реализации механизмом трех заданных положений шатуна (жестко связанного с грейфером).

Сначала сделаем необходимые геометрические построения трех положений грейфера.

В командной строке GeoGebra введем следующие команды:

- задаем предварительно длину грейфера (в относительных единицах)

```
gr=2
```

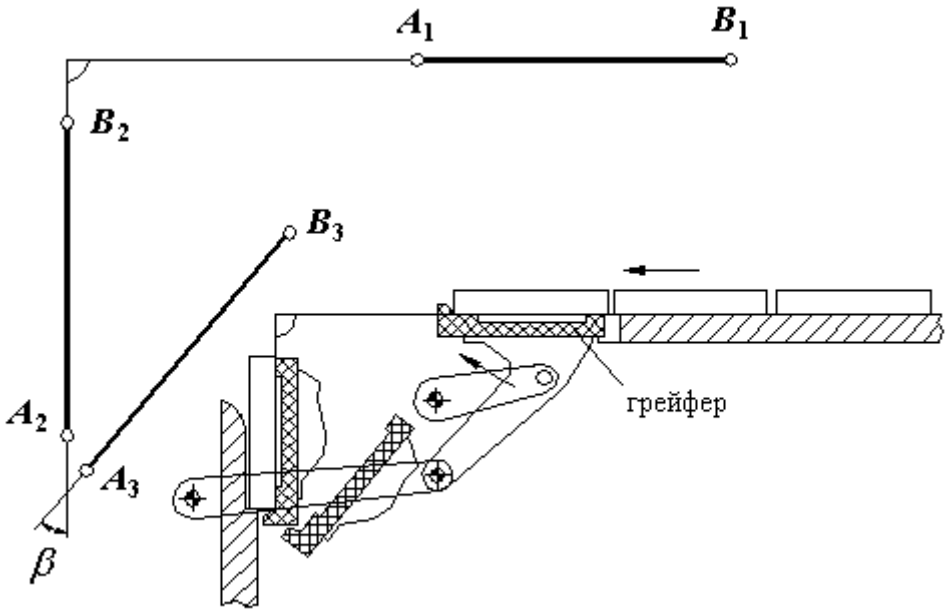


Рис. 5. Три положения грейфера направляющего механизма

- задаем углы наклона грейфера к горизонтали

θ1=0

θ2=90*π/180

θ3=60*π/180

- конструктивно задаем координаты точек A_1, A_2, A_3 соответствующих одной из точек грейфера в 3-х положениях

- находим координаты точек B_1, B_2, B_3 соответствующих другой точке грейфера.

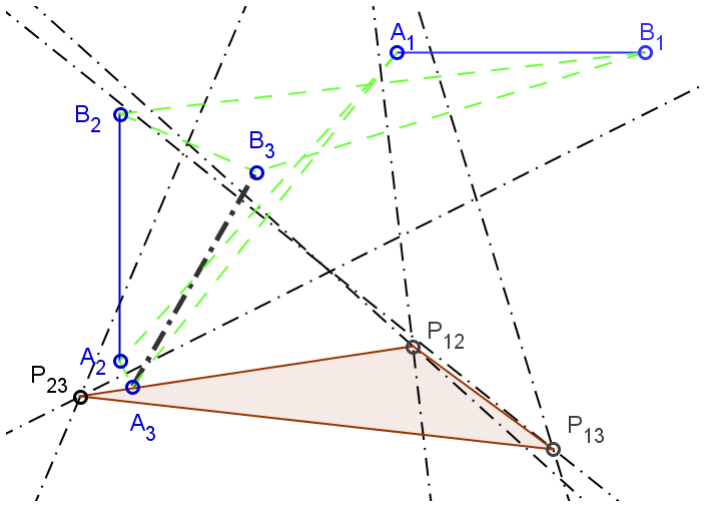


Рис. 6. Построение полюсного треугольника по трем положениям грейфера

Далее выберем из меню команду построения отрезков по двум точкам и, соединяя отрезками точки A_1, B_1 и т.д., получим изображение 3-х заданных положений грейфера.

Для построения полюсного треугольника воспользуемся наличием в системе GeoGebra очень удобных команд проведения серединных перпендикуляров через отрезки.

На рис. 6 показан результат построения полюсного треугольника по 3-м заданным положениям грейфера. Далее можно найти положения неподвижных шарниров на стойке. Вначале найдем положение шарнира C_0 - центр вращения кривошипа. Конструктивно зададим в первом положении координаты шарнира C_1, соединяющего шатун с кривошипом. Пусть эта точка будет лежать на оси симметрии грейфера. Затем, следуя построениям рассмотренным в примере 1 разд. 2, можно получить точки C_2 и C_3 в остальных двух заданных положениях механизма. Точка вращения кривошипа C_0 будет располагаться в центре круга проходящего через точки C_1, C_2 и C_3. Эти построения показаны на рис. 7.

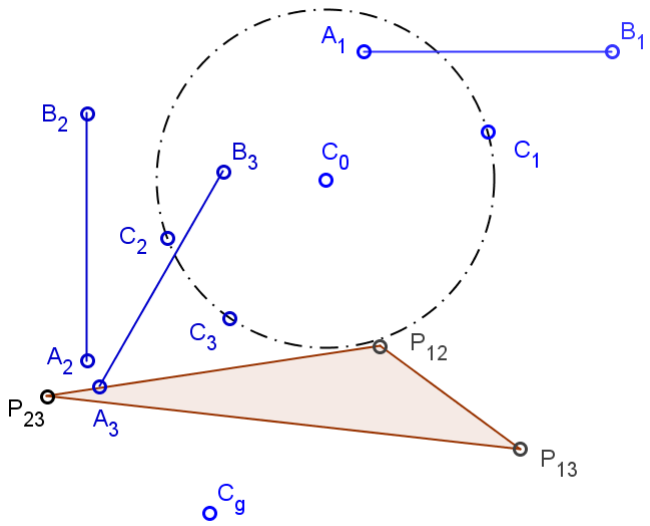


Рис. 7. Построение 3-х положений шарнира С четырехзвенника и центра вращения кривошипа

Положение второго неподвижного шарнира D_0 – центра вращения коромысла также можно выбрать из конструктивных соображений. При этом необходимо учесть, что при некоторых положениях шарнира D_0 может получиться непроворачивающийся механизм, т.е. ведущее звено не будет поворачиваться на 360°. Подробную информацию о проворачиваемости механизмов и определении областей расположения шарниров можно получить в статье [6].

Итак конструктивно задаем координаты точки D_0 : D_0=(-1, 0). Следуя построениям примера 2 разд. 2. проведем через точку D_0 и полюса P_{12}, P_{13} прямые $D_0 P_{12}$ и $D_0 P_{13}$. Повернув эти прямые вокруг полюсов P_{12} и P_{13} на углы $-\phi_{12}/2$ и $-\phi_{13}/2$, получим в пересечении прямых точку D_1.

Положения точек D_2 и D_3 находим как обычно, следуя примеру 1 разд. 2. Эти построения показаны на рис. 8.

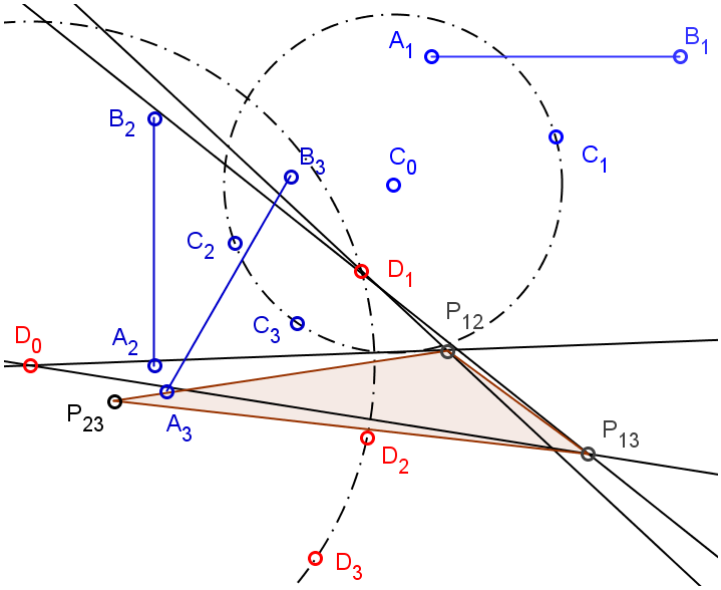


Рис. 8. Построение 3-х положений шарнира D четырехзвенника и центра вращения коромысла

В заключение по найденным точкам выполним схему направляющего механизма в трех положениях (рис. 9).

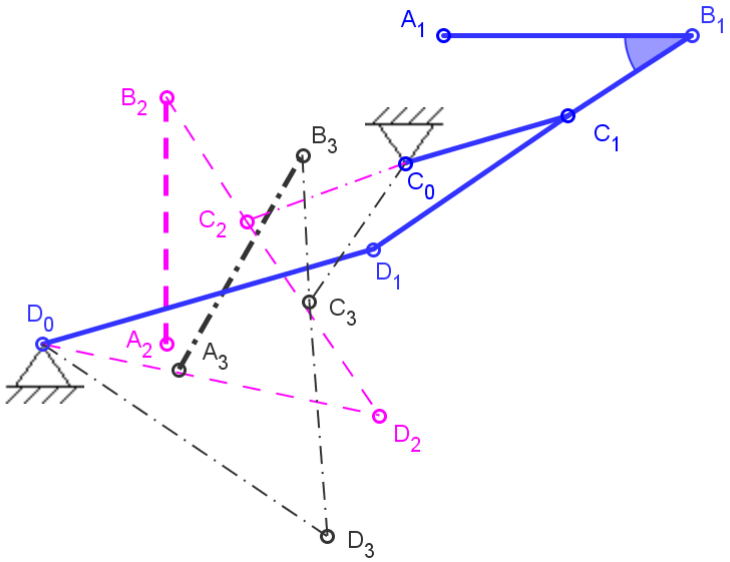


Рис. 9. Схема направляющего механизма в трех положениях

Геометрические параметры механизма, т.е. координаты всех его точек в течение всех геометрических построений и после их завершения можно видеть на панели объектов с любой выбранной точностью.

Заключение

В данной статье показано применение системы GeoGebra для решения простых задач кинематической геометрии плоских механизмов. На практике, при проектировании, часто бывает достаточно знать три положения механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burmester L. “Uber die Geradfuhrung durch das Kurbelgetriebe" Civilingenieur. 1877. B.23 S. 227 u. 321.
   а также: Burmester L. Lehrbuch der Kinematik, Verlag Von Arthur Felix, Leipzig, Germany, 1888.
2. Schoenflies A., Geometrie der Bewegung in synthetischer Darstellung, Leipzig, 1886.
3. Артоболевский И.И., Левитский Н.И., Черкудинов С.А., Синтез плоских механизмов. – М.: ФМ. 1959.- 1084с.
4. Бейер Р. Кинематический синтез механизмов. Киев. Машгиз, 1959.- 318 с.
5. Добровольский В.В. Теория механизмов. – М.: Машгиз, 1953.- 472с.
6. Богельзак Г. О проворачиваемости механизма синтезируемого для трех положений. //Сборник статей: Левитский Н.И. Анализ и синтез механизмов - М.: Машиностроение. 1969.- с. 118-127.
7. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Компьютерная анимация кинематических схем в программах Excel и MathCad. // Теория механизмов и машин. 2008. №1(11). С. 71-80.
8. Зиатдинов Р.А. Геометрическое моделирование и решение задач проективной геометрии в системе GeoGebra // Материалы конференции “Молодежь и современные информационные технологии”, Томский политехнический университет, г. Томск. 2010. с. 168-170 (http://msit.tpu.ru/files/conf_2010_p1.pdf)

УДК 621.01:534.1

И. И. Вульфсон

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ В ЦИКЛОВЫХ МЕХАНИЗМАХ ПРИ УЧЁТЕ ЭНЕРГИИ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ СВЯЗЯХ



Иосиф Исаакович Вульфсон, д.т.н., профессор кафедры теоретической и прикладной механики Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна
ул. Большая Морская, 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия.
Тел.: (812)310-1561, E-mail: jov@sutd.ru.

Аннотация

В докладе показано, что нестационарность связей, свойственная приводам машин с цикловыми механизмами, во многих случаях является источником энергетической «подпитки» колебаний, а также приводит к нежелательному перераспределению колебаний между подсистемами и формами. Приводятся условия, подавляющие рост виброактивности, и инженерные рекомендации.

Ключевые слова: Цикловой механизм, колебания, энергия, системы с переменными параметрами.

I.I. Vulfson

ANALYSIS OF VIBRATIONS IN CYCLIC MECHANISMS AT THE ACCOUNT OF ENERGY GENERATED IN NONSTATIONARY COUPLINGS

Dr. Iosif I. Vulfson, Prof.
St. Petersburg State University of Technology and Design, Russia

Abstract

It is shown, that in drives of machines with cyclic mechanisms the nonstationary couplings are a source of energy "feeding" of oscillatory process. This also leads to an undesirable redistribution of oscillations between subsystems, and forms. Conditions for suppressing increase of vibroactivity and engineering advice are resulted.

Key words: cyclic mechanisms, vibrations, energy, systems with variable parameters.

1. Нестационарность связей, свойственная приводам машин с цикловыми механизмами, во многих случаях является источником энергетиче-

ской «подпитки» колебаний, а также приводит к нежелательному перераспределению колебаний и их концентрации в определённых узлах, звеньях, сечениях и.т.п. В частности, в подобных случаях возможны локальные нарушения условий динамической устойчивости, когда на ограниченных отрезках времени происходит интенсивный рост амплитуд колебаний [1, 2]. Непосредственно к рассматриваемому классу задач относится пространственная локализация в колебательных цепочках [3 – 6] . При этом в определённых сечениях нарушается строгая динамическая регулярность системы из-за так называемых «включений», с которыми обычно связано возникновение чётко выраженных экстремумов в формах колебаний. На базе классической модели данная задача в работе [4] конкретизирована на примере колебаний струны, а также балок Бернулли-Эйлера и Тимошенко с сосредоточенными включениями.

Подобные эффекты наблюдаются также при анализе динамики машин и автоматических линий с повторяющимися секциями (модулями). В частности, устранение пространственной локализации необходимо при проектировании машин с повышенной протяжённостью зоны технологической обработки изделия, когда колебания длинных рабочих органов должны быть близки к синфазным [5, 6]. Нарушение этого требования приводит к появлению помимо нежелательных динамических эффектов к разного рода дефектам выпускаемой продукции, таким как неравнота пряжи и кромочные дефекты при изготовлении тканей, обрывы нитей, повреждения печатной продукции в полиграфических машинах, нарушения заданной точности и чистоты обрабатываемой поверхности в металлорежущих станках и др. Однако, в реальных условиях сохранить синфазную форму колебаний при относительно большом числе приводных цикловых механизмов удаётся далеко не всегда.

Отметим, что рассматриваемая проблема носит достаточно общий характер и встречается в различных разделах физики. В частности, в квантовой механике известно так называемое туннелирование Ландау–Зинера, при котором при внешнем возмущении в системе происходит энергетический обмен между двумя уровнями [7, 8].

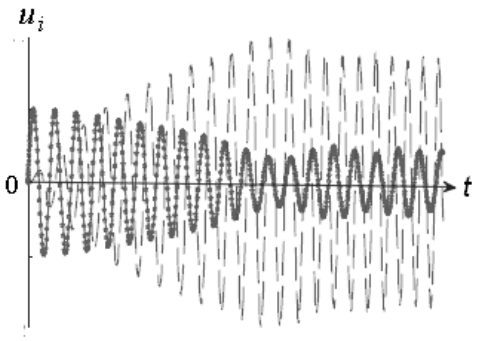


Рис.1. Эффект переноса колебаний в механическом аналоге туннелирования Ландау–Зинера

В работе [7] был предложен механический аналог туннелирования, представляющий собой систему двух слабо связанных маятников, в которой парциальная частота одного из них медленно изменяется во времени и перекрывает зону внутреннего резонанса. При этом, если переход энергии от одного осциллятора к другому оказывается необратимым, то возникает своеобразная ловушка для «захвата» колебательной энергии. Такой эффект на рис. 1 иллюстрируется графиками переноса колебаний u_i из одной подсистемы (сплошная линия) в другую (штриховая линия), приведёнными в работе [8].

2. Рассмотрим данную проблему на примере динамической модели циклового механизма с упругим приводом при последовательном соединении элементов $J_0 - c_1 - J_1 - \Pi - c_2 - J_2$ (рис.2). Примем следующие условные обозначения: $\varphi_0 = \omega_0 t$ – идеальная координата J_0 при $\omega_0 = \text{const}$; J_i – моменты инерции; c_i – коэффициенты жёсткости; ψ_i – коэффициенты рассеяния; $\varphi_1 = \varphi_0 + q_1$; $\varphi_2 = \Pi(\varphi_0) + q_2$, где φ_i – абсолютные угловые координаты соответствующих инерционных элементов; q_i – обобщённые координаты, равные абсолютным динамическим ошибкам, т.е. отклонениям от заданного программного движения; Q_i – обобщенные силы.

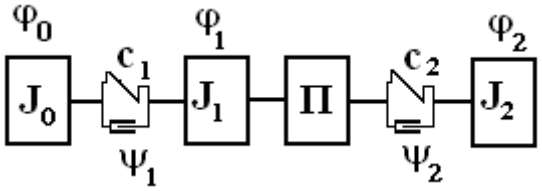


Рис. 2. Динамическая модель циклового механизма с переменными параметрами

Полагая функцию положения $\Pi(\varphi_1)$ непрерывной и дифференцируемой, произведём линеаризацию этой функции и её первых двух производных в окрестности программного движения [1,2]:

$$\Pi(\varphi_0 + q_1) = \Pi_* + \Pi'_* q_1; \;\; \Pi'(\varphi_0 + q_1) = \Pi'_* + \Pi''_* q_1. \qquad (1)$$

Здесь звёздочка отвечает аргументу $\varphi_0 = \omega_0 t$.

Согласно (1) данной модели после линеаризации в окрестности программного движения соответствует система дифференциальных уравнений

$$\left.\begin{aligned} &\ddot{q}_1 + k_1(2\delta_1\dot{q}_1 + k_1 q_1) + \mu k_2 \Pi'_*[2\delta_2(\Pi'_*\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + k_2(\mu\Pi'_* q_1 - q_2)] = W_1(t); \\ &\ddot{q}_2 + k_2[2\delta_2(\dot{q}_2 - \Pi'_*\dot{q}_1) + k_2(q_2 - \Pi'_* q_1)] = W_2(t), \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где $k_i = \sqrt{c_i / J_i}$; $\mu = \sqrt{J_2 / J_1}$; $\delta_i = \psi_i / (4\pi)$ $(i = 1,2)$; ψ_i – коэффициент рассеяния; $\Pi'_* = d\Pi / d\varphi$ при $\varphi = \varphi_0 = \omega_0 t$; $W_i(t)$ – внешнее возбуждение.

В задачах динамики механизмов диссипативные и гироскопические члены, пропорциональные $\dot{q}_i$, обычно пренебрежимо мало влияют на «собственные» частоты p_i, но в то же время оказывают существенное влияние на амплитуды колебаний. Тогда, при дискретно заданных параметрах после линеаризации в окрестности программного движения частотный и модальный анализ может быть проведён на базе системы однородных дифференциальных уравнений

$$\mathbf{a}(t)\ddot{\mathbf{q}}+\mathbf{c}(t)\mathbf{q}=0, \qquad (3)$$

где $\mathbf{a}(t),\mathbf{c}(t)$ – квадратные матрицы инерционных и квазиупругих коэффициентов; $\mathbf{q}$ – вектор-функция обобщённых координат.

Как показано в работе [9] с точностью до величин первого порядка малости кинетическая и потенциальная энергия определяются зависимостями $T=0,5\sum_{r=1}^{H}a_r^*\dot{\eta}_r^2;\ V=0,5\sum_{r=1}^{H}c_r^*\eta_r^2,$ где η_r – квазинормальные координаты; H – число степеней свободы колебательной системы. При этом переменные «собственные» частоты в первом приближении могут быть определены на базе формального частотного уравнения, в котором время играет роль параметра:

$$\det\left(c_{ij}(t)-a_{ij}\,p(t)^2\right)=0. \qquad (4)$$

В квазинормальных координатах система уравнений принимает вид

$$a_r^*(t)\ddot{\eta}_r+[b_r(t)+\dot{a}_r^*(t)]\dot{\eta}_r+c_r^*(t)\eta_r=M_r(t), \qquad (r=\overline{1,H}) \qquad (5)$$

Здесь $M_r(t)=\sum_{i=1}^{H}\alpha_{ir}Q_{ir}^*;\ Q_{ir}^*$ – неконсервативная обобщённая сила от внешних нагрузок и кинематического возбуждения; $b_r(t)$ – коэффициент эквивалентного линейного сопротивления, приведенного к форме r;

$a_r^*=\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{H}\alpha_{ir}\alpha_{jr}a_{ij};\ c_r^*=\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{H}\alpha_{ir}\alpha_{jr}c_{ij}$, где α_{ir},α_{jr} – нестационарные коэффициенты формы.

В матричном виде имеем

$$\boldsymbol{\alpha}^T\mathbf{a}\,\boldsymbol{\alpha}=\mathrm{diag}\left\{a_1^*,\ldots a_H^*\right\};\ \boldsymbol{\alpha}^T\mathbf{c}\,\boldsymbol{\alpha}=\mathrm{diag}\left\{c_1^*,\ldots c_H^*\right\}. \qquad (6)$$

После возвращения к исходным координатам $\mathbf{q}=\boldsymbol{\alpha}(t)\boldsymbol{\eta}$.

При приведенном способе определения квазинормальных координат формы колебаний исходя из физических предпосылок принимаются как медленно меняющиеся функции; в остальном их определение не отличается от аналогичной процедуры при постоянных параметрах. Отметим лишь, что в отличие от традиционной индексации частот, когда большему индексу соответствует более высокая частота, здесь предпочтительна индекса-

ция, при которой $k_r = \lim\limits_{\Pi' \to 0} p_r$. Тогда на выстое выходного звена, когда система вырождается в два несвязанных колебательных контура, частота p_r равна парциальной частоте с тем же индексом.

Для рассматриваемой модели медленно меняющиеся «собственные» частоты согласно (4) являются корнями следующего биквадратного уравнения:

$$p^4 - \{k_1^2 + k_2^2[1 + \mu\Pi'^2(\varphi_0)]\}p^2 + k_1^2 k_2^2 = 0. \qquad (7)$$

Свободный член уравнения (7) не зависит от времени, следовательно, на основании одной из теорем Виета $p_1(t)p_2(t) = \text{const}$. Это означает, что минимуму одной из частот соответствует максимум другой.

Приведём уравнения (5) к виду

$$\ddot{\eta}_r + 2n_r(t)\dot{\eta}_r + p_r^2(t)\eta_r = W_r(t) \quad (r = 1, 2), \qquad (8)$$

где $n_r(t) = 0{,}5\dot{a}_r(t)/a_r(t) + \delta_r p_r(t)$; $p_r(t) = \sqrt{c_r(t)/a_r(t)}$; $W_r(t) = M_r(t)/a_r(t)$.

Воспользуемся методом условного осциллятора, который при медленно меняющейся функции положения приводит к решению на уровне ВКБ-приближения первого порядка [1,2]. Тогда

$$\eta_r = A_{r0}\exp[-\int_0^t n_r(t)dt]\sqrt{k_r / p_r(t)}\cos[\int_0^t p_r(t)dt + \alpha_r] + Y_r(t), \qquad (9)$$

где A_{r0}, α_r – определяются начальными условиями, а частное решение $Y_r(t)$ может быть представлено как

$$Y_r(t) = \frac{1}{\sqrt{p_r(t)}}\int_0^t \frac{W_r(u)}{\sqrt{p_r(u)}}\exp[-\int_u^t n_r(\xi)d\xi][\sin\int_u^t p_r(\xi)d\xi]du. \qquad (10)$$

Зависимость (10) при $p_r = \text{const}$ совпадает с формулой Дюамеля.

В рассматриваемой колебательной системе помимо энергетических потерь, возникающих при преодолении диссипативных сил, происходит обмен энергией с внешним источником энергии неограниченной мощности. Остановимся на анализе свободных колебаний $(Y_r(t) \equiv 0)$. В практике динамического расчёта технологических машин свободные колебания чаще всего представляют интерес с позиций частотного анализа, являющегося важным этапом определения вынужденных колебаний. При этом принимается во внимание, что свободные колебания, возникающие за счёт энергии, внесённой в систему в начальный момент времени, достаточно быстро затухают и практически не оказывают влияния на установившиеся колебательные режимы. Между тем виброактивность цикловых технологических машин в основном определяется уровнем так называемых свободных сопровождающих колебаний [1,2,5,6], которые при сложных законах движения, зазорах и других возмущениях импульсного характера не только затухают, но и снова периодически возбуждаются. Строго говоря, эти колебания следует также отнести к вынужденным колебаниям, однако

по частотному спектру, удалённости от резонансов и методике анализа их удобнее рассматривать как свободные колебания, возникающие при $t = t_i > 0$. При этом соответствующие «начальные» условия определяются при представлении частного решения (9) в виде быстро сходящегося ряда по производным функции возмущения $W_r(t)$ [1, 2].

Можно показать, что свободные колебания системы при любом t будут убывающими, если $n_r + \dot{p}_r/(2p_r) > 0$ [1,2]. Это неравенство является достаточным условием динамической устойчивости на произвольном отрезке кинематического цикла.

3. Проанализируем некоторые динамические эффекты, обусловленные переносом энергии. При этом целесообразно перейти к «безразмерному времени», в качестве которого примем $\varphi_0 = \omega_0 t$. Пусть закон движения выходного звена описывается гармонической функцией вида $\Pi(\varphi) = r_0(1 - \cos\varphi)$. На рис. 3 приведены графики нормированных переменных частот $p_r(\varphi_0)$ при $k_1 = 10$, $k_2 = 32$ (пунктирная линия) и $k_1 = k_2 = 32$ (сплошная линия).

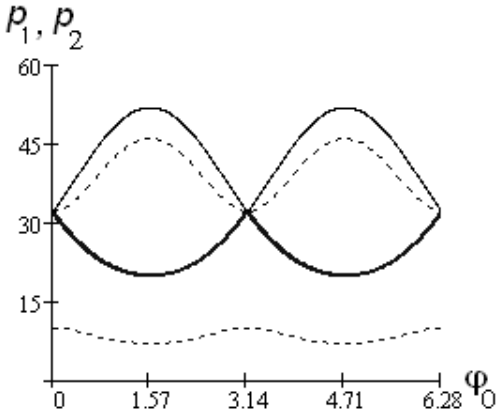


Рис. 3. Графики «собственных» частот

Пусть при $\varphi_0 = 0$ подсистема выходного звена получает импульсное возмущение $(\dot{q}_2(0) \neq 0)$. На рис. 4, для ряда режимов приведены графики $q_1(t)$ (сплошная линия) и $q_2(t)$ (пунктирная линия), а также соответствующие фазовые портреты, полученные при компьютерном моделировании системы уравнений (2). Для большей наглядности графиков диссипативные члены и внешнее возбуждение в системе (2) опущены. При $\Pi'(0) = 0$ подсистемы между собой не связаны, поэтому исходный запас энергии полностью «принадлежит» подсистеме 2 (координата q_2). При $\Pi'(\varphi) \neq 0$ энергия перераспределяется между обеими подсистемами. При режиме 1 чётко виден рост колебаний на входном звене (кривая 1) по мере уменьшения амплитуд в подсистеме выходного звена (кривая 2); при этом доминируют колебания, по частоте близкие к парциальной частоте k_2.

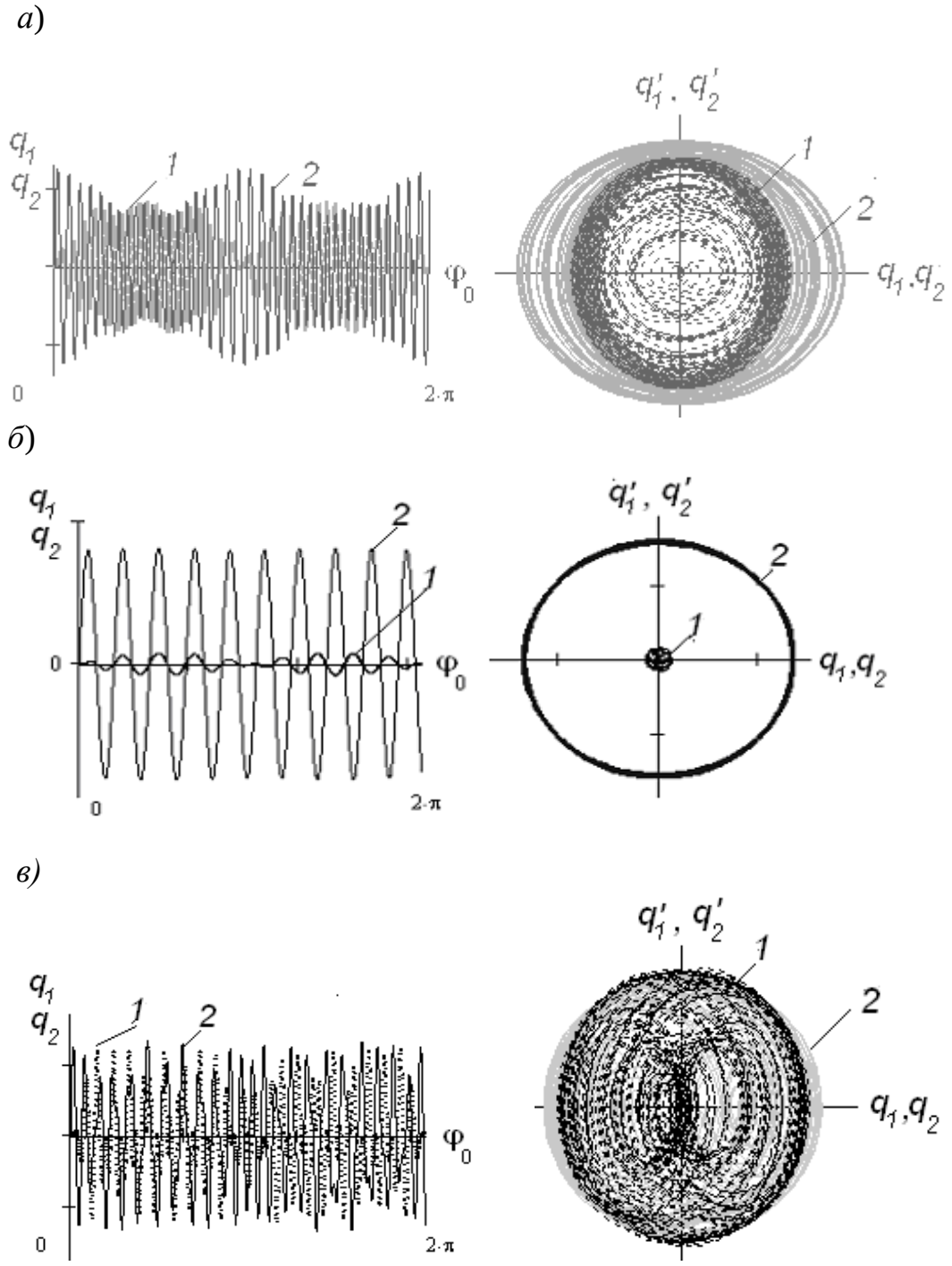


Рис. 4. К анализу переноса колебаний: *а*– режим 1, $k_1 = 10,\ k_2 = 32$; *б* – режим 2, $k_1 = 32,\ k_2 = 10$; *в* – режим 3, $k_1 = k_2 = 32$

В отличие от этого режима при обратном соотношении парциальных частот (режим 2) доминируют низкочастотные колебания, причём перенос колебаний из второй подсистемы в первую практически отсутствует. При равенстве парциальных частот (режим 3), интенсивное возбуждение подсистемы входного звена наблюдается уже при очень малых значениях Π'. Отметим, что при близких парциальных частотах появляются зоны с повышенной плотностью частного спектра, в которых интенсивность энерге-

тического обмена между формами колебаний резко возрастает. Для фиксированного значения $f = \mu\Pi' < 1$ частоты наиболее близки при $\kappa = k_2 / k_1 = \sqrt{1 - f^2}\,/(1 + f^2)$. При этом значении f

$$p_2 / p_1 = \sqrt{(1 - f)/(1 + f)}\,.$$

Для приведенных режимов в конце кинематического цикла практически полностью восстанавливается исходный уровень амплитуд в обеих подсистемах. Однако это не всегда так (см ниже). Нормированное значение энергии колебаний для рассматриваемой модели может быть представлено как

$$E = 0{,}5\{\mu[k_2^2(q_2 - \Pi'_* q_1)^2 + (\Pi'_* + q'_2)^2] + (1 + q'_1)^2 + k_1^2 q_1^2\}, \quad (11)$$

где $\mu = J_2 / J_1$.

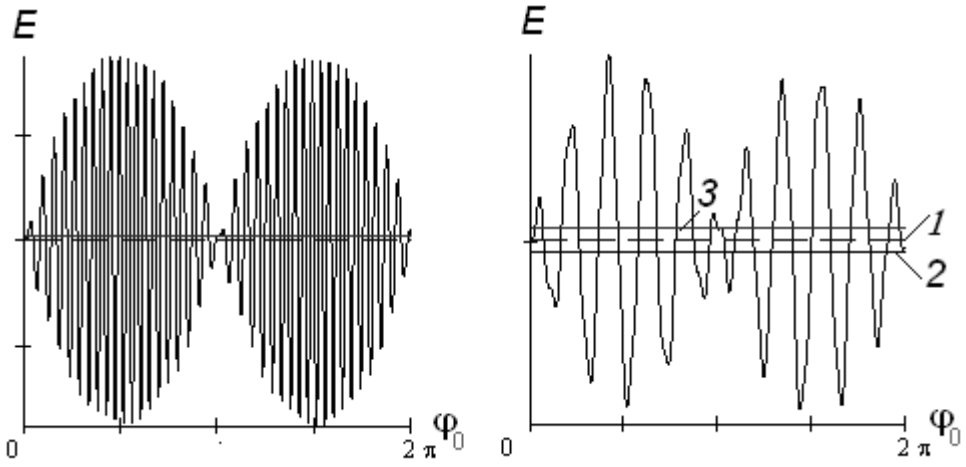


Рис. 5. Графики изменения энергии колебаний

На рис. 5 для режимов 1 и 2 приведены полученные на основании (11) графики изменения энергии колебаний на одном периоде кинематического цикла.

Отметим, что при исключении диссипативных сил и внешних возмущений переменность функции $E(\varphi_0)$ связана только с нестационарностью связей при $\Pi' \neq 0$. Действительно, при $\Pi' = \text{const}$ система оказывается консервативной, следовательно, при свободных колебаниях энергия системы сохраняется постоянной и равна энергии, внесённой в систему за счёт начальных условий. Этому энергетическому уровню на графике отвечает прямая 1. На графиках показаны ещё два уровня, соответствующие $\varphi_0 = 2\pi$ (прямая 2) и $\varphi_0 = \pi$ (прямая 3). При строгой кратности частот и ω_0 прямые 1 и 2 совпадают.

Существенное отличие энергии колебаний внутри кинематического цикла от $E(0)$ связано с работой гироскопических сил, которая в данном случае близка к нулю только при $\varphi_0 = 2\pi$. Однако при более сложных законах движения, а также в многосвязных системах сложной структуры возникают режимы с биениями, при которых накопление энергии происходит на относительно большом отрезке времени [5].

Таким образом, в цикловых механизмах виброактивность зависит не только от перераспределения энергии между подсистемами, но и в значительной степени определяется дополнительным «вкладом», вносимым внешним источником при реализации нестационарных связей. Аналогичная ситуация имеет место при параметрическом резонансе, однако в нашем случае речь идёт о локальных нарушениях условий динамической устойчивости при медленном изменении параметров, когда не требуется определенной частотной настойки [1,2].

Для принятой модели критическое значение коэффициента демпфирования определяется следующим образом:

$$\delta > \delta_* = \frac{3\mu\Pi'_*\Pi''_*\omega_0}{2k_1\sqrt{1+\mu\Pi'^2_*}}.$$

В заключение отметим, что в цикловых системах кольцевой структуры распределение энергии между подсистемами играет ещё большую роль, поскольку энергетические факторы оказывают существенное влияние на трансформацию нестационарных форм и пространственную локализацию колебаний [5,6]. Однако эта проблема требует отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вульфсон И.И. Динамические расчёты цикловых механизмов. – Л.: Машиностроение, 1976.– 328 с.
2. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия.– Машиностроение, 1990.– 309 с.
3. Маневич Л. И., Михлин Ю. В., Пилипчук В. Н. Метод нормальных колебаний для существенно нелинейных систем.– М.: Наука, 1989.– 216 с.
4. Индейцев Д.А., Кузнецов Н.Г., Мотыгин О.В. и др. Локализация линейных волн. – СПб.: Изд-во. С.- Петерб. ун-та , 2007.– 342 с.
5. Вульфсон И.И. Синфазность и пространственная локализация колебаний рабочих органов цикловых машин с симметричной динамической структурой.// Проблемы машиностроения и надежности машин, 2011. №1.– С.12–18.
6. Вульфсон И. И., Преображенская М.В. Исследование колебательных режимов, возбуждаемых при перекладке в зазорах цикловых меха-

низмов, соединенных с общим исполнительным органом. //Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. №1. – С. 33–39.
7. Косевич Ю. А., Маневич Л. И., Маневич Э. Л. Колебательный аналог неадабатического туннелирования Ландау – Зинера и возможность создания энергетических ловушек нового типа // Успехи физических наук. 2010. Т.180, №12 .С. 1331 – 1334.
8. Kovaleva A., Manevitch L., Kosevich Yu. Fresnel integrals and irreversible energy transfer in an oscillatory system with time-dependent parameters // Physical Review E., 2011. V. 83. P.p. 026602-1-12.
9. Митропольский Ю. А. Проблемы асимптотической теории нестационарных колебаний. М.: Наука, 1964. – 432 с.

УДК 621.865.8

В.М.Герасун, В.В.Жога, И.А.Несмиянов,
Н.С.Воробьёва, В.В.Дяшкин-Титов

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОГРУЗОЧНОГО МАНИПУЛЯТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ[1]



Владимир Морисович Герасун, д.т.н., профессор
Волгоградский государственный аграрный университет
проспект Университетский, 26, Волгоград, 400002, Россия.
Тел.: (8442)41-18-49, E-mail: Gerasun@ro.ru.



Виктор Викторович Жога, д.ф-м.н., профессор
Волгоградский государственный технический университет
проспект Ленина, 28, Волгоград, 400131, Россия.
Тел.: (8442)24-80-99, E-mail: Zhoga@vstu.ru.



Иван Алексеевич Несмиянов, к.т.н., доцент
Волгоградский государственный аграрный университет
проспект Университетский, 26, Волгоград, 400002, Россия.
Тел.: (8442)41-12-39, E-mail: ivan_nesmiyanov@mail.ru.



Наталья Сергеевна Воробьёва, к.т.н., доцент
Волгоградский государственный аграрный университет
проспект Университетский, 26, Волгоград, 400002, Россия.
Тел.: (8442)41-18-49, E-mail: vorobva@inbox.ru.



Виктор Владимирович Дяшкин-Титов, аспирант, Волгоградский государственный аграрный университет, проспект Университетский, 26, Волгоград, 400002, Россия. Тел.: (8442)41-18-49, E-mail: c_43.52.00@mail.ru.

Аннотация

Получено условие сохранения геометрической неизменяемости манипулятора параллельной структуры, исключающее возможность появления мертвых положений; определены усилия в гидроцилиндрах для устойчивой работы.

Ключевые слова: манипулятор параллельной структуры, устойчивость.

[1] Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 13-08-00387 и №12-08-00301-а

V.M.Gerasun, V.V.Zhoga, I.A.Nesmiyanov,
N.S.Vorobieva, V.V.Dyashkin-Titov

RESISTANCE LOADING MANIPULATOR WITH SPATIAL EXECUTIVE MECHANISM RESEARCH

Vladimir M. Gerasun[1], e-mail: Gerasun@ro.ru;
Victor V. Zhoga[2], e-mail: Zhoga @vstu.ru;
Ivan A. Nesmiyanov[1], e-mail: ivan_nesmiyanov@mail.ru;
Natalia S.Vorobieva[1], e-mail: vorobva@inbox.ru;
ViktorV. Dyashkin-Titov[1], e-mail: c_43.52.00@mail.ru.
[1]Volgograd Agrarian University, Russia,
[2]Volgograd State Technical University, Russia.

Abstract

The condition of maintenance of geometrical stability of the manipulator of the parallel structure, excluding possibility of emergence of dead provisions is received; efforts in hydraulic cylinders for steady work are defined.

Key words: manipulator of parallel structure, resistance.

Поиск технических решений снижающих металлоемкость мобильной погрузочно-разгрузочной техники является актуальной задачей ее развития [1,2]. Анализ конструкций современных автомобильных гидрокранов показывает, что масса отдельных узлов, образующих опорно-поворотное устройство (кронштейн стрелы, рама, механизм поворота) может доходить до 43% от общей металлоемкости [3,4,5]. Проведенные ранее исследования показали, что снижение массы на 14...21% можно обеспечить используя в кинематических цепях манипулятора пространственные *l*-координатные механизмы [6,7,8,9].

На рис. 1 представлен манипулятор, у которого перемещение рабочего устройства достигается с помощью гидроцилиндров, образующих пространственную структуру в виде треугольной пирамиды. Корпуса гидроцилиндров закреплены шарнирно на несущем основании, а штоки соединены между собой и со стрелой специальной шаровой опорой. Перемещение звеньев механизма в процессе работы приводит к изменению его геометрической конфигурации, и как следствие, к возможности появления мертвых положений [10,11].

Поэтому необходимы исследования по определению условий устойчивой работы механизма, гарантирующих отсутствие критических положений.

На рис. 2 представлена расчетная схема погрузочного манипулятора. Введем условные обозначения.



Рис. 1. Погрузочный манипулятор с пространственным исполнительным механизмом

$BC = a$; $AC = AB = в$; $DC = L_1$; $DB = L_2$; $AD = L_0$

$$\frac{L_0}{в} = k; \quad \xi_1 = \frac{L_1}{L_{10}}; \quad \xi_2 = \frac{L_2}{L_{20}}; \quad k_1 = \frac{L_{10}}{в} = \frac{L_{20}}{в}, \tag{1}$$

где $L_{10} = L_{20}$ – первоначальные длины гидроцилиндров

$$tg\omega = \frac{\bar{x}}{\bar{y}\cos\alpha + \bar{h}\sin\alpha}, \tag{2}$$

где

$$\bar{x} = \frac{k_1^2(\xi_1^2 - \xi_2^2)}{4\sin\beta}, \tag{3}$$

$$\bar{y} = \frac{2(1+k^2) - k_1^2(\xi_1^2 + \xi_2^2)}{4\cos\beta}, \tag{4}$$

$$\bar{h} = \sqrt{k^2 - \bar{x}^2 - \bar{y}^2}. \tag{5}$$

Угол подъема стрелы над горизонтом

$$\delta = \gamma_4 - \gamma_3, \tag{6}$$

где

$$\cos\gamma_4 = \frac{\bar{y} + \bar{x}\cos\alpha \cdot tg\omega}{k\sqrt{1 + tg^2\omega \cdot \cos^2\alpha}}; \tag{7}$$

$$tg\gamma_3 = \cos\omega \cdot tg\alpha. \tag{8}$$

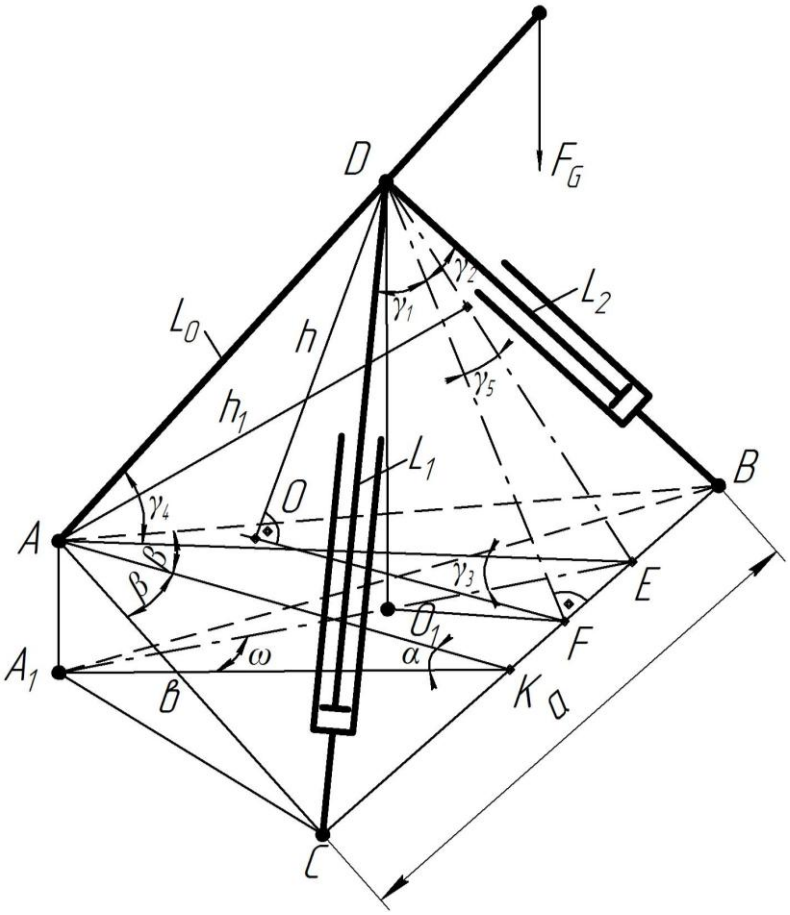


Рис. 2. Расчетная схема манипулятора.

Усилия в гидроцилиндрах 1 и 2

$$F_1 = -F_G\left(\frac{L}{в}\right)\frac{\cos\delta\cdot\sin(\gamma_2-\gamma_5)}{t}; \tag{9}$$

$$F_2 = -F_G\left(\frac{L}{в}\right)\frac{\cos\delta\cdot\sin(\gamma_1+\gamma_5)}{t}; \tag{10}$$

где

$$\sin\gamma_1 = \frac{k_1^2(\xi_1^2-\xi_2^2)+4\sin^2\beta}{4k_1\xi_1\sin\beta}; \tag{11}$$

$$\sin\gamma_2 = \frac{4\sin^2\beta-k_1^2(\xi_1^2-\xi_2^2)}{4k_1\xi_2\sin\beta}; \tag{12}$$

$$tg\gamma_5 = \frac{\sin 2\beta\cdot\cos\alpha\cdot tg\omega-2\bar{x}\sin\beta}{k_1^2\xi_1\xi_2\sin\gamma}; \tag{13}$$

$$\gamma = \gamma_1+\gamma_2; \tag{14}$$

$$t = \frac{k\sin 2\beta\sqrt{1+tg^2\omega\cdot\cos^2\alpha}\cdot\cos\gamma_5\cdot\sin\gamma_4}{k_1^2\xi_1\xi_2}. \tag{15}$$

Система из трех стержней будет мгновенно изменяемой в том случае, когда все стержни будут находиться в одной плоскости, т.е. в плоскости опорного треугольника *ABC*. При проектировании необходимо выбрать геометрические размеры стержней таким образом, чтобы при всех возможных изменениях их длин исключить возможность возникновения мгновенной изменяемости. Очевидно, что стержни будут лежать в плоскости опорного треугольника в том случае, когда высота пирамиды *h* становится равной нулю.

При вертикальном подъеме груза в плоскости симметрии

$$\xi_1 = \xi_2 = \xi_{\max};$$

из формулы (5) полагая $\bar{h} = 0$, получим условия сохранения геометрической неизменяемости

$$k^2 - 2k\cos\beta + 1 \le k_1^2 \xi_{\max}^2. \tag{16}$$

При горизонтальном повороте стрелы

$$\begin{gathered} \xi_1 = \xi_{\max}; \quad \xi_2 = 1; \\ 4(1+k^2)\sin^2\beta - 4(1+k^2)\left[k_1^2(\xi_{\max}^2+1)\sin^2\beta + \sin^2 2\beta\right] + \\ + k_1^4(\xi_{\max}^4 - 2\xi_{\max}^2\cos 2\beta + 1) + 4\sin^2 2\beta \le 0 \end{gathered} \tag{17}$$

Задаваясь значениями k_1 из неравенства (16) и (17) находим границы изменения *k*, причем неравенство (16) ограничивает значения "К" сверху, а неравенство (17) снизу.

Если ограничить подъем стрелы до вертикального положения ($\delta < 90°$), то неравенство для определения *k* в зависимости от k_1 примет вид:

$$k^2 + 2k\cos\beta\cos\alpha + 1 \ge k_1^2 \xi_{\max}^2. \tag{18}$$

Расчеты по формулам (17) и (18) показывают, что при $\alpha > 15°$ выполнение неравенства (17) автоматически гарантирует выполнение неравенства (18). Кроме того, необходимо соблюдать условия образования треугольника, т.е.

$$a + k_1 в > k_1 в \xi_{\max}; \quad k_1 < \frac{2\sin\beta}{\xi_{\max} - 1}. \tag{19}$$

В таблице 1 приведены результаты подсчета коэффициентов *k* и k_1 по выражению (17) для гидроцилиндров с $\xi_{\max} = 1{,}8$.

Таблица 1

k_1		0,8	1,0	1,2	1,4
$k >$	$\beta = 45°$	0,511	0,843	1,213	1,606
	$\beta = 30°$	0,723	1,123	1,667	-

Подбором соответствующих значений k, k_1 и β можно устанавливать зону обслуживания манипулятора.

Максимальный угол поворота стрелы в горизонтальной плоскости

$$tg\omega_{\max} = \frac{x_0}{y_0 \cos\alpha + h_0 \sin\alpha}, \tag{20}$$

где

$$x_0 = \frac{k_1^2(\xi_{\max}^2 - 1)}{4\sin\beta}; \tag{21}$$

$$y_0 = \frac{2(1+k^2) - k_1^2(\xi_{\max}^2 + 1)}{4\cos\beta}; \tag{22}$$

$$h_0 = \sqrt{k^2 - x_0^2 - y_0^2}. \tag{23}$$

При значении коэффициентов k и k_1, соответствующих критическому положению гидроцилиндров наибольший допустимый угол поворота. При увеличении значения k свыше критического максимальный угол поворота резко падает (рис. 3).

Начальный угол наклона стрелы к горизонту в плоскости симметрии

$$\delta_0 < \arccos\frac{1+k^2-k_1^2}{2k\cos\beta} - \alpha. \tag{24}$$

Максимальный угол подъема стрелы в плоскости симметрии

$$\delta_{\max} < \arccos\frac{1+k^2-k_1^2\xi_{\max}^2}{2k\cos\beta} - \alpha. \tag{25}$$

По формулам (24) и (25) построены графики при $\beta = 30°$ и $\xi_{\max} = 1{,}8$, изображенные на рис. 3.

Из графиков видно, что при увеличении значения коэффициента k_1, для допустимых с точки зрения геометрической неизменяемости значений k, максимальный угол подъема стрелы уменьшается.

Устойчивая работа погрузочного манипулятора обеспечивается при тех значениях $k > k_{кр}$, при которых усилия в гидроцилиндрах не превышают допустимые для заданной грузоподъемности. Для обеспечения этого усло-

вия необходимо построить графики усилий в гидроцилиндрах в зависимости от значений коэффициентов k и k_1, и, исходя из заданной грузоподъемности, установить необходимые размеры манипулятора.

Наиболее опасные усилия возникают в том случае, когда один из гидроцилиндров имеет минимальную длину, а другой - максимальную.

В этом случае усилия в гидроцилиндрах определяются по формулам (9 -15) при $\xi_1 = \xi_{\max}$; $\xi_2 = 1$.

Графики усилий, подсчитанных по этим формулам, приведены на рис. 4, 5. Там же показаны графики изменения максимального угла поворота в зависимости от изменения коэффициентов k_1 и k.

При критическом значении коэффициента k усилия в гидроцилиндрах достигают бесконечности, причем первый гидроцилиндр растянут, а второй сжат.

По мере увеличения коэффициента k усилия в гидроцилиндрах уменьшаются и при некотором значении k в первом гидроцилиндре усилие становится сжимающим. Но при этом резко уменьшается максимальный возможный угол поворота в горизонтальной плоскости.

При $\alpha = \pi/2$ (опоры всех гидроцилиндров расположены в вертикальной плоскости) максимальный угол поворота в горизонтальной плоскости

$$\omega_{\max} = \frac{\pi}{2}.$$

Максимальный угол подъема стрелы в плоскости симметрии

$$\delta = \arcsin \frac{k_1^2 \xi_{\max}^2 - 1 - k^2}{2k \cos \beta}. \qquad (26)$$

Усилия в гидроцилиндрах

$$F_1 = -\frac{F_G L}{в} \cdot \frac{k_1 \xi_1}{2k \cos \beta}; \quad F_2 = -\frac{F_G L}{в} \cdot \frac{k_1 \xi_2}{2k \cos \beta}. \qquad (27)$$

Усилия в гидроцилиндрах, при максимальной длине первого и минимальной длине второго гидроцилиндров, определяются по формулам

$$F_1 = -\frac{F_G L}{в} \cdot \frac{k_1 \xi_{\max}}{2k \cos \beta}; \quad F_2 = -\frac{F_G L}{в} \cdot \frac{k_1}{2k \cos \beta}. \qquad (28)$$

Усилия в обоих гидроцилиндрах будут сжимающими во всех режимах работы.

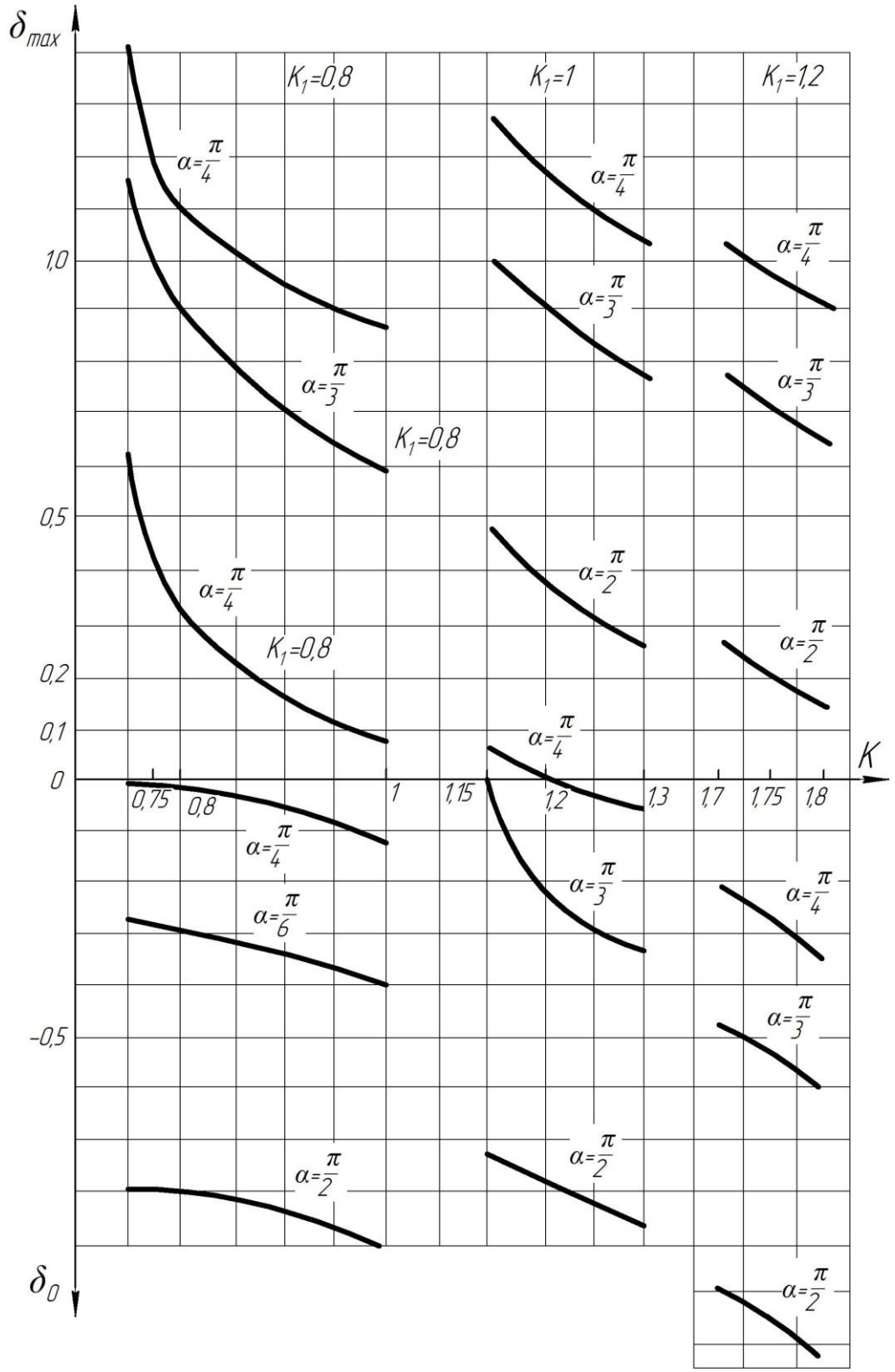


Рис. 3. Взаимосвязь угла поворота опорного треугольника α, угла подъема стрелы δ и относительного параметра k

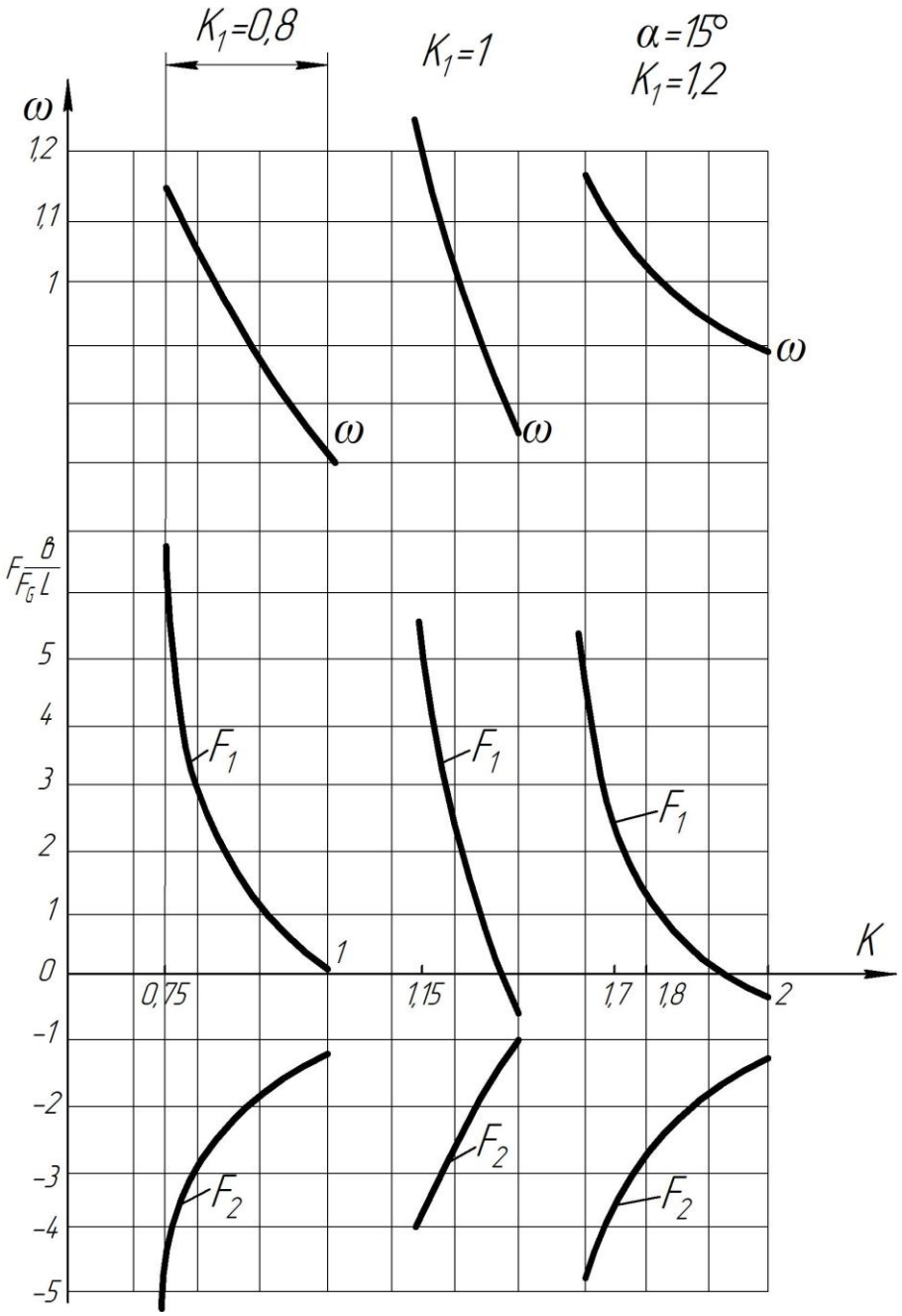


Рис. 4. Изменение усилий в гидроцилиндрах и угла поворота стрелы по горизонту от относительного параметра *k*

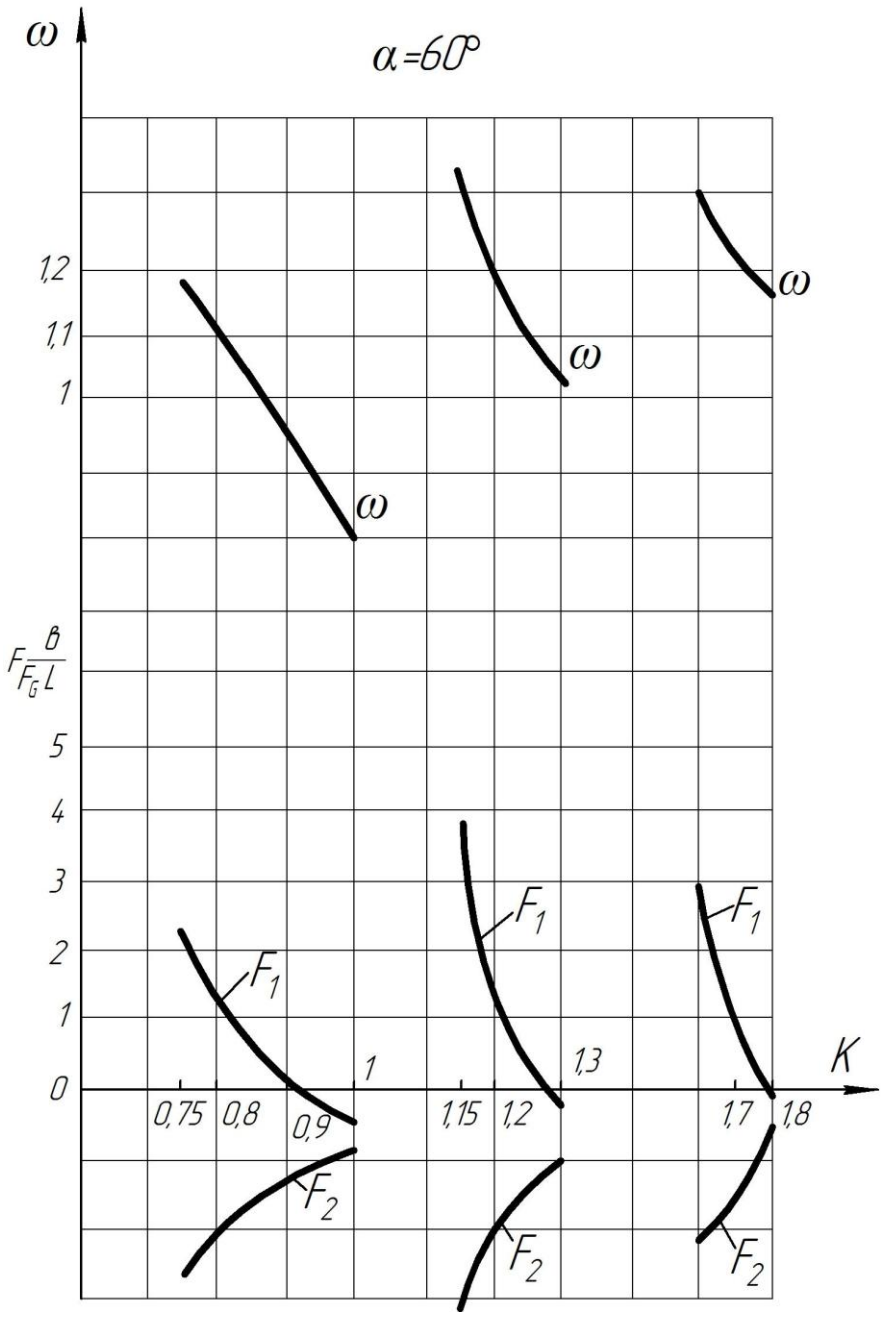


Рис. 5. Изменение усилий в гидроцилиндрах и угла поворота стрелы по горизонту от относительного параметра *k*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасун, В.М. Погрузочно-транспортные агрегаты в технологических процессах растениеводства //XIII Международная научно практическая конференция «Новые технологии и техника для ресурсосбережения и повышения производительности труда в растениеводстве и животноводстве». Москва, ВИМ 2005.
2. Герасун, В.М. Разработка высокотехнологичных транспортно-погрузочных агрегатов сельскохозяйственного назначения на блочно-мо-

дульной основе /Задачи аграрных вузов России по научному обеспечению инновационного развития АПК. Материалы Всероссийского совещания проректоров по научной работе, г. Волгоград,6-8 июля 2011г.-Волгоград.-256 с.

3. Герасун, В.М. Синтез погрузочно-транспортных агрегатов на модульной основе/ В.М. Герасун, А.Ф. Рогачев// Тракторы и сельхозмашины № 7, 1998.
4. Герасун, В.М. Упрощенный метод определения динамических нагрузок в металлоконструкции стрелы гидрофицированных манипуляторов/ В.М. Герасун, А.Л.Конюшков // Грузовик: Строительно-дорожные машину, автобус, троллейбус, трамвай. №9, 2010.
5. Герасун, В.М. Оценка динамического коэффициента металлоконструкции стрелы гидрофицированных погрузочных манипуляторов при подъеме груза с основания/ В.М. Герасун, А.Л.Конюшков // Тракторы и сельскохозяйственные машины №4,2010. с.48-50.
6. Герасун В.М., Потемкин А.П. Пути снижения металлоемкости навесных погрузчиков с поворотной стрелой.// Тракторы и сельхозмашины. 1985 г, №7, С. 33-34.
7. Герасун, В.М. Опыт использования пространственных механизмов в кинематических целях манипуляторов /В.М. Герасун, А.Ф. Рогачев, И.А. Несмиянов//Труды XXI международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника » Санкт-Петербург, Издательство «Политехника-сервис», 2010. с. 169-172.
8. В.М. Герасун, В.И. Пындак, И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов, В.Е. Павловский. /Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования/ Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. №44.24с.
9. Герасун, В.М. Синтез манипулятора для мобильного робота на гусеничном шасси/ В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, А.Ф. Рогачев, В.Е. Павловский// Мехатроника, автоматизация, управление, №5, 2011. с.51-54.
10. Кинематическое исследование манипулятора-трипода / Герасун В.М. [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. / Под.ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 251 – 258.
11. Мардер Б.О., Рашоян Г.В. Об особых положениях *l*-координатных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990, №6, С. 39-43.
12. Манипуляционные системы роботов/ А.И. Корендясев., Б.Л. Саламандра., Л.И. Тывес др.; Под общ.ред. А.И. Корендясева.-М.: Машиностроение, 1989.-472 с.; ил.

УДК 621.01

А.А. Джомартов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТКАЦКОГО СТАНКА СТБ НА SIMULATIONX



Асылбек Абдразакович Джомартов, д.т.н., член-корр. НИА РК
Институт механики и машиноведения, Казахстан, Алматы
Тел.: (727)272-3426, E-mail: legsert @mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрено моделирование динамики ткацкого станка СТБ программном комплексе SimulationX. SimulationX - это междисциплинарный программный комплекс для моделирования физико-технических объектов и систем. Построенная динамическая модель ткацкого станка СТБ на программном комплексе SimulationX позволяют учитывать зазоры в соединениях и узлах, силы сопротивления и характеристики электродвигателя.

Ключевые слова: динамика, ткацкий станок СТБ, моделирование, SimulationX

A.A. Djomartov

MODELING OF DYNAMICS OF LOOM STB ON SIMULATIONX

Dr. Assylbek A. Djomartov, Corresponding Member,
Institute of Mechanics and Engineering them. Academician
U.A.Dzholdasbekova, Kazakhstan, Almaty, e-mail: legsert@mail.ru

Abstract

In the paper we consider the modeling of dynamics of loom STB on software complex SimulationX. SimulationX - a multidisciplinary software for modeling complex physical and technical facilities and systems. Dynamic model of the loom of STB on software package SimulationX allow taking into account backlash at the joints and nodes, the force of resistance and electric motor performance.

Key words: dynamics, loom STB, modeling, SimulationX

Одной из важнейших тенденций в развитии текстильного машиностроения является повышение быстроходности ткацких станков, следовательно, и их производительности. С ростом скоростей ткацких станков,

динамические нагрузки на отдельные их механизмы и подвижные соединения резко возрастают. В этих условиях выявление наиболее слабых мест и элементов машины является первоочередной задачей динамического расчета.

Современные ткацкие станки СТБ представляют собой сложную разветвленную механическую систему. В технологическом процессе формирования ткани участвует большое число различных по структуре и назначению механизмов. Это плоские и пространственные кулачковые, рычажные, зубчатые, фрикционные и комбинированные цикловые механизмы, динамические модели которых могут быть представлены в более или менее сложном виде в зависимости от целей и задач исследования.

Реальная механическая система имеет бесконечное число степеней свободы. Степень идеализации реальной системы при ее отображении динамической моделью зависит от многих факторов. Предполагая, что инерционные параметры системы (масса или моменты инерции) сосредоточены в отдельных точках или сечениях, которые соединены безынерционными, упругодиссипативными, геометрическими связями, можно составить динамическую модель с ограниченным количеством числа степеней свободы. Практическое использование отмеченного предположения сводится к тому, что в системе выделяются наиболее массивные элементы, а также наиболее податливые участки кинематической цепи. Инерционные, упругие и диссипативные свойства остальных элементов учитываются приведенными значениями соответствующих параметров. На базе такой модели могут быть проанализированы некоторые вопросы исследования станка СТБ в целом, например, на основе изучения динамических характеристик отдельных механизмов и узлов при различных оборотах главного вала можно наметить пути повышения надежности их звеньев или создать принципиально новые механизмы.

Конструктивная схема станка СТБ [1] показана на рис. 1, где указаны основные узлы и механизмы. Перечень обозначений механизмов к конструктивной схеме станка СТБ: 1 - привод механизма выталкивания прокладчиков утка правой приемной коробки; 2- привод механизмов правой приемной коробки; 3 – привод механизма правых ножниц; 4 - привод механизма правого кромкообразователя; 5 – верхний вал; 6 - привод механизма левого кромкообразователя; 7 – привод механизма левых ножниц; 8 - привод механизма возвратчика утка; 9 – привод механизма верхней левой коробки; 10 - привод механизмов компенсатора и тормоза уточной нити; 11 – механизм роликовой блокировки; 12 - товарный вал; 13 - скало; 14 – передача привода скало; 15 – нижний наборный вал; 16 - навой; 17 - дифференциал; 18 – привод нижнего наборного вала; 19 – поперечный вал левой уточно-боевой коробки; 20-23 – приводы механизмов соответственно левой уточно-боевой коробки, раскрывателя пружин прокладчиков утка, подъема прокладчиков утка, раскрывателя пружины нитеуловителя, боевого; 24 – пе-

редача от главного вала на поперечный вал левой уточно-боевой коробки; 25 – передача от главного вала на верхний вал; 26 – главный приводной вал станка; 27 - брус батана; 28 – конвейер прокладчиков утка; 29 - электродвигатель привода главного вала станка; 29 - клиноременная передача привода главного вала станка.

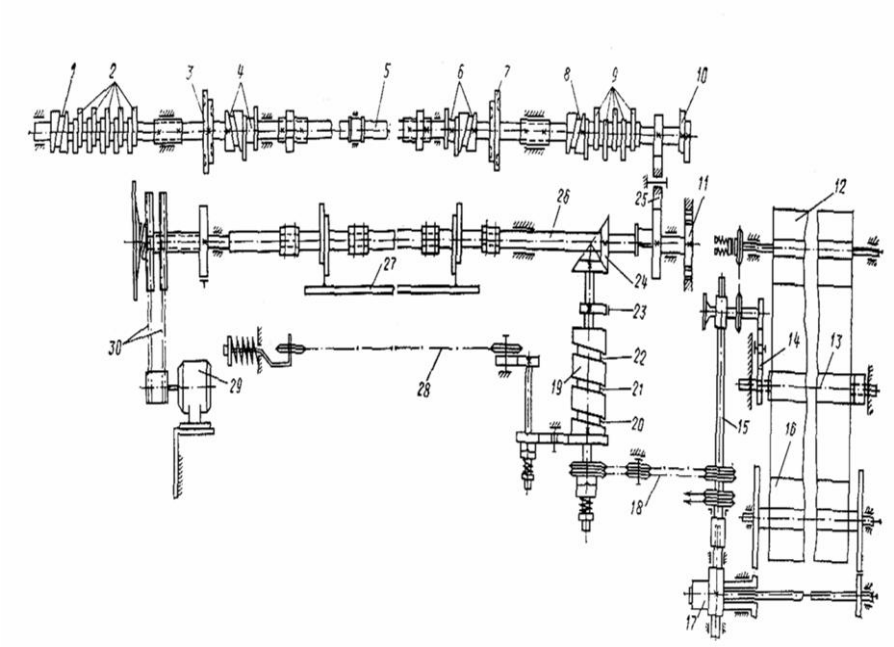


Рис. 1. Конструктивная схема ткацкого станка СТБ

В качестве обобщенной динамической модели рассматривается многомассовая крутильная колебательная система. Инерционные и упругие свойства элементов учитываются в виде соответствующих приведенных значений. Распределений по длине вала момент инерции приведены к соответствующим сечениям валопроводов станка-автомата.

В работе [2] впервые рассмотрена задача построения динамической модели ткацких станков СТБ для изучения работоспособности и взаимодействия отдельных механизмов с точки зрения повышения производительности системы в целом.

Представим динамическую модель станка в виде разветвленной цепной схемы (рис.2). Основой ее является главный вал станка, от которого приводятся в движение все его механизмы. Вращение от асинхронного электродвигателя переменного тока с моментом инерции $J_0 = const$ ротора и шкива передается на главный вал через клиноременную передачу $П_1$ жесткостью c_1 на шкив и крестовину фрикционной муфты, имеющими момент инерции $J_1 = const$ и закрепленных на правом конце главного вала вместе с тормозным барабаном (группа механизмов - I).

Главный вал станка состоит из отдельных частей различной длины и жесткости на кручение $c_{k_1}, c_{k_2}, c_{k_3}, c_{k_7}$. В средней части участка вала выполнены как одно целое со сдвоенными кулачками привода механизма прибоя (ба-

тана), моменты инерции которых $\tilde{J}_2$ являются переменными, т.к. привод батана и его участки являются кулачково-коромысловыми механизмами с большей, по сравнению с другими механизмами станка, скоростью движения и массой (группа механизмов - II).

От конической зубчатой передачи $П_2$, момент инерции которой обозначен $J_3 = const$, вращение передается на поперечный распределительный вал левой уточно-боевой коробки. От него приводится в движение целая группа механизмов переменной и постоянной структуры, связанная с прокладыванием уточной нити.

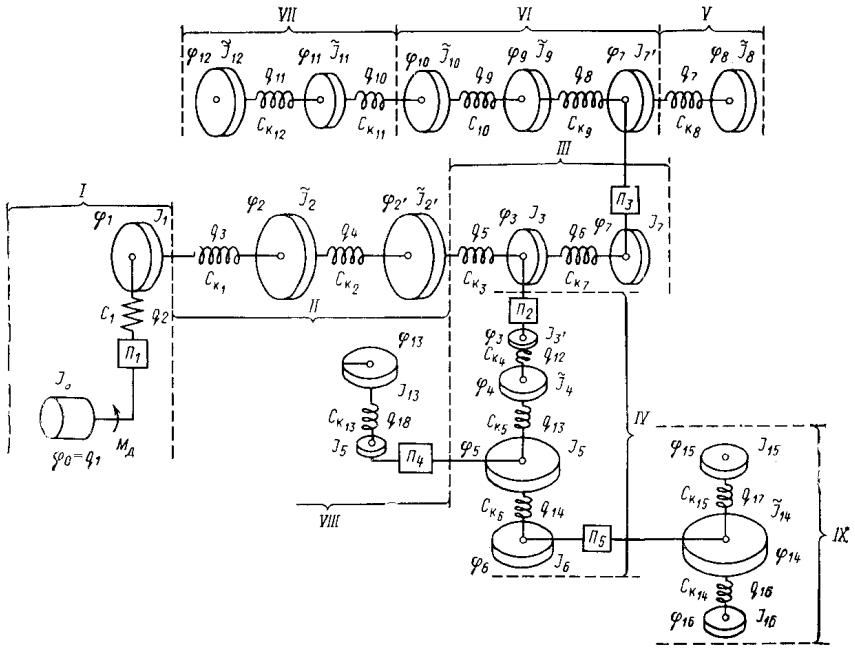


Рис. 2. Динамическая модель ткацкого станка СТБ

Участок вала на левом конце с жесткостью на кручение c_{k_7} оканчивается цилиндрической зубчатой передачей $П_3$ с моментом инерции $J_7 = const$ (группа механизмов - III). Механизмы и детали уточно-боевой коробки, связанные с распределительным валом, образуют группу IV. К механизмом V-ой группы относятся кулачково-рычажные механизмы компенсации и торможения уточной нити постоянной структуры с плоскими кулачками и переменным моментом инерции $\tilde{J}_8$. Крутильная жесткость участка верхнего вала от шестерни привода до кулачков обозначена c_{k_8}

К VI-ой группе механизмов верхней левой коробки отнесены механизмы: возвратчика уточной нити с раскрывателем пружины возвратчика, левых ножниц центрирующего устройства, левого уточного контроллера, суммарный приведенный переменный момент инерции которых на дина-

мической модели обозначен $\tilde{J}_9$. Жесткость на кручение участка верхнего вала от приводной шестерни обозначена на схеме c_{k_9}. К этой же группе отнесены механизмы левого кромкообразователя и нитеуловителя, суммарный приведенный момент инерции которых обозначен на схеме $\tilde{J}_{10}$ а жесткость на кручение участка вала между двумя выделенными подгруппами механизмов $c_{k_{10}}$.

К VII-ой группе механизмов отнесены механизмы правой приемной коробки, а именно правого кромкообразователя и нитеуловителя, суммарный приведенный момент инерции которых $\tilde{J}_{11}$, а жесткость на кручение участка верхнего вала между группами механизмов VI и VII обозначена $c_{k_{11}}$. К данной группе отнесены также механизмы торможения, контроля посадки и возврата прокладчиков, раскрывателя пружин прокладчиков, выталкивания и укладки прокладчиков на транспортер, правого уточного контроля и ножниц. Их суммарный приведенный момент инерции обозначен $\tilde{J}_{12}$, а жесткость на кручения участка вала между выделенными подгруппами механизмов обозначена через $c_{k_{12}}$.

Все механизмы верхних левой и правой коробок, приводимые от верхнего вала (группами механизмов VI и VII), являются кулачково-рычажными механизмами постоянной и переменной структуры с цилиндрическими пазовыми и плоскими кулачками, со скоростью вращения кулачков, соответствующей скорости вращения главного вала, и сравнительно небольшой приведенной массой подвижных звеньев.

От поперечного распределительного вала левой уточно-боевой коробки, как отмечалось выше, через цилиндрическую зубчатую передачу $П_4$, приведенный момент инерции которой обозначен J_{13}, приводится в движение цепной конвейер прокладчиков с постоянной массой подвижных частей m_1 (группа механизмов - VIII). Причем жесткость на кручение верхнего вала привода транспортера и предохранительной муфты предельного момента обозначена на схеме $c_{k_{13}}$, и продольная жесткость ветвей цепи амортизирующих элементов транспортера обозначена c_4, c_2.

От нижнего наборного вала приводится в движение IX группа механизмов станка, а именно:

а) сдвоенной цепной передачей $П_5$ приводятся в движение механизмы каретки (ремизоподьемный, зевообразовательный механизм) и механизм смены цвета утка с приведенным суммарным моментом инерции $\tilde{J}_{14}$;

б) товарные валы с постоянным приведенным моментом инерции $J_{15} = const$, крутильная жесткость участка вала привода товарных валов обозначена на схеме $c_{k_{15}}$;

в) от заднего конца нижнего наборного вала приводятся в движение механизмы регулятора и натяжения основы, суммарный приведенный момент инерции которых обозначен $J_{16} = const$, а жесткость на кручение участка вала от приводной звездочки до червячной передачи - $c_{k_{16}}$.

Механизмы подгруппы б) и в), входящие в группу IX (товарные валы, регулятор и натяжение основы), имеют большие массы звеньев, небольшие скорости движения и воспринимают большие статические нагрузки. Их влияние на динамику станка в целом, также как основа (рамной, сварнолитой, сборной массивной конструкции), заключается в демпфировании колебаний, возбуждаемых другими быстроходными механизмами (батанным, боевым и др.).

На основе динамической модели ткацкого станка СТБ (рисунок 2), используя уравнения Лагранжа 2-го рода с избыточными координатами [3], можно получить дифференциальные уравнения описывающие динамику станка. Однако их составление, решение и анализ полученных результатов представляет весьма сложную задачу, что показано в работе [2].

Динамика ткацкого станка СТБ хорошо может быть рассчитана на программном комплексе SimulationX. SimulationX – это междисциплинарный программный комплекс для моделирования физико-технических объектов и систем, который разработан и продаётся на коммерческой основе фирмой ITI GmbH [4] из Дрездена с 2000 года. Ученые и инженеры, работающие в промышленности и сфере образования, используют этот инструмент для разработки, моделирования, симулирования, анализа и виртуального тестирования сложных мехатронных систем. На единой платформе программа моделирует поведение и взаимодействие различных физических объектов механики (1D и 3D), приводной техники, электрических, гидравлических, пневматических и термодинамических систем, а также магнетизма и аналоговых и цифровых систем управления.

Необходимо отметить основное достоинство программы SimulationX, которое состоит в быстром построении моделей из интуитивно-понятных объектов механики (масса, сила, момент, пружина, демпфер, трение, рычаг и т.д.), пневматики и гидравлики (пневмоцилиндр, клапан, дроссель и др.), машиностроения и электромеханики (моторы, муфты, сцепления, зубчатая и другие передачи, карданный вал, дифференциал и т.д.) и управления (датчики-измерители, управляющие сигналы и пр.)

На рис. 3 изображена динамическая модель ткацкого станка СТБ на SimulationX.

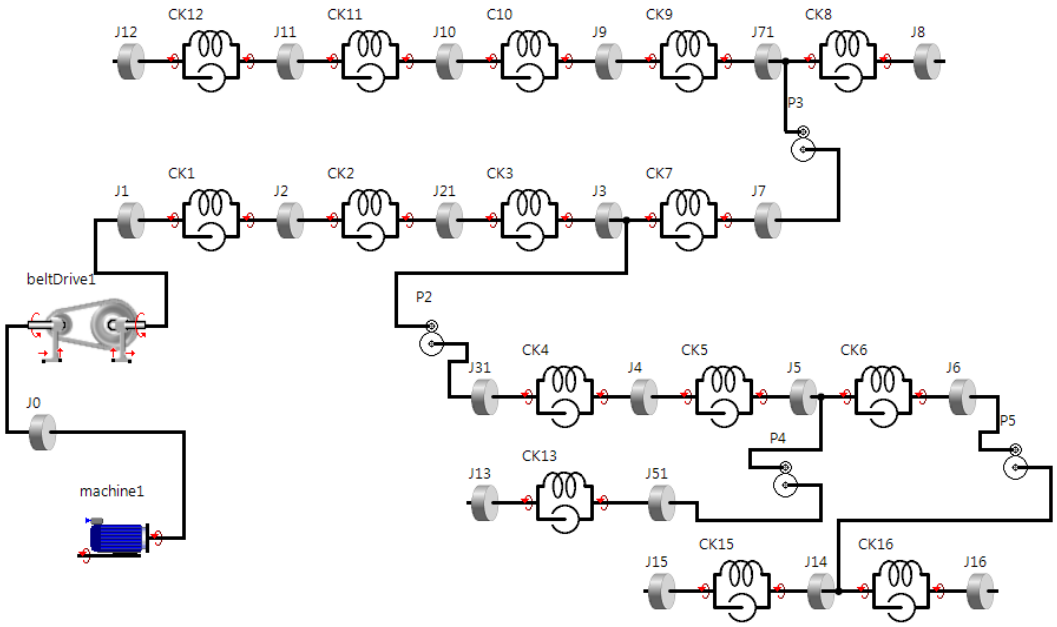


Рис. 3. Динамическая модель ткацкого станка СТБ на SimulationX.

Результаты моделирования: Расчет динамической модели ткацкого станка СТБ-180ПН проводился без учета внешних сил при частоте вращения двигателя 1440 оборотов в минуту. На рис. 4 показана диаграмма Кембелла. В таблице 1 приведены собственные частоты.

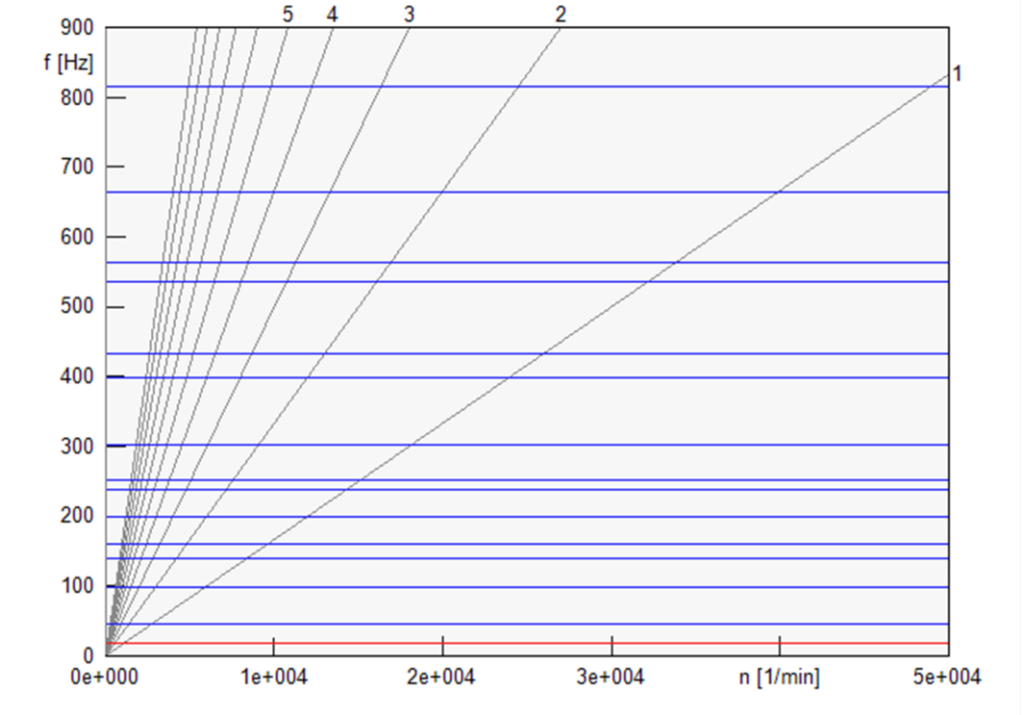


Рис. 4. Диаграмма Кембелла

Таблица 1. Собственные частоты и формы колебаний

Natural Frequencies and Modes\Natural Frequencies
Eigenvalues

No.	Value	f [Hz] (undamped)	f [Hz] (damped)	D [-]	Time Constant [s]
T1	-1.6484E-009				6.0664E+008
T2	-38.614				0.025897
f1	-113.55+117.6 i	26.018	18.717	0.6946	0.0088068
f2	-113.55+-117.6 i	26.018	18.717	0.6946	0.0088068
f3	-2.9986+287.29 i	45.726	45.724	0.010437	0.33349
f4	-2.9986+-287.29 i	45.726	45.724	0.010437	0.33349
f5	-6.0346+614.75 i	97.846	97.841	0.0098158	0.16571
f6	-6.0346+-614.75 i	97.846	97.841	0.0098158	0.16571
f7	-12.092+-873.04 i	138.96	138.95	0.013849	0.082698
f8	-12.092+873.04 i	138.96	138.95	0.013849	0.082698
f9	-15.826+999.8 i	159.14	159.12	0.015827	0.063187
f10	-15.826+-999.8 i	159.14	159.12	0.015827	0.063187
f11	-25.856+1247.8 i	198.64	198.6	0.020716	0.038676
f12	-25.856+-1247.8 i	198.64	198.6	0.020716	0.038676
f13	-36.142+-1497.2 i	238.36	238.29	0.024132	0.027669
f14	-36.142+1497.2 i	238.36	238.29	0.024132	0.027669
f15	-17.678+-1581 i	251.65	251.63	0.01118	0.056569
f16	-17.678+ 1581 i	251.65	251.63	0.01118	0.056569
f17	-17.68+-1581.1 i	251.65	251.63	0.011182	0.05656
f18	-17.68+1581.1 i	251.65	251.63	0.011182	0.05656
f19	-56.656+-1892.1 i	301.27	301.13	0.029931	0.01765
f20	-56.656+1892.1 i	301.27	301.13	0.029931	0.01765
f21	-99.74+2509.6 i	399.73	399.42	0.039712	0.010026
f22	-99.74+-2509.6 i	399.73	399.42	0.039712	0.010026
f23	-117.74+2726.3 i	434.3	433.9	0.043146	0.0084936
f24	-117.74+-2726.3 i	434.3	433.9	0.043146	0.0084936
f25	-180.46+-3373.5 i	537.68	536.91	0.053416	0.0055415
f26	-180.46+3373.5 i	537.68	536.91	0.053416	0.0055415
f27	-198.91+3541.3 i	564.5	563.61	0.056081	0.0050274
f28	-198.91+-3541.3 i	564.5	563.61	0.056081	0.0050274
f29	-276.11+4169.7 i	665.08	663.63	0.066073	0.0036218
f30	-276.11+-4169.7 i	665.08	663.63	0.066073	0.0036218
f31	-418.79+-5129.4 i	819.09	816.37	0.081373	0.0023878
f32	-418.79+5129.4 i	819.09	816.37	0.081373	0.0023878

На рисунках 5-8 показаны графики скорости и ускорения первого и двенадцатого дисков модели

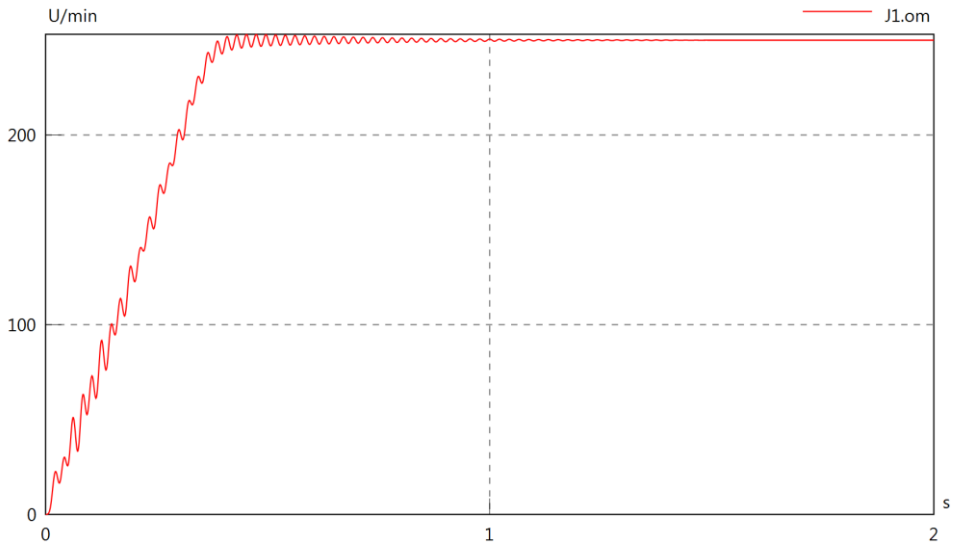


Рис. 5. Угловая скорость первого диска

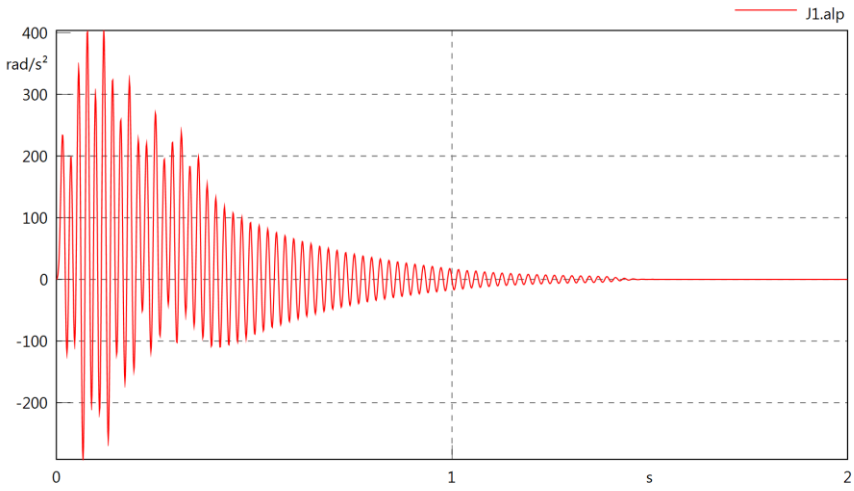


Рис. 6. Угловое ускорение первого диска

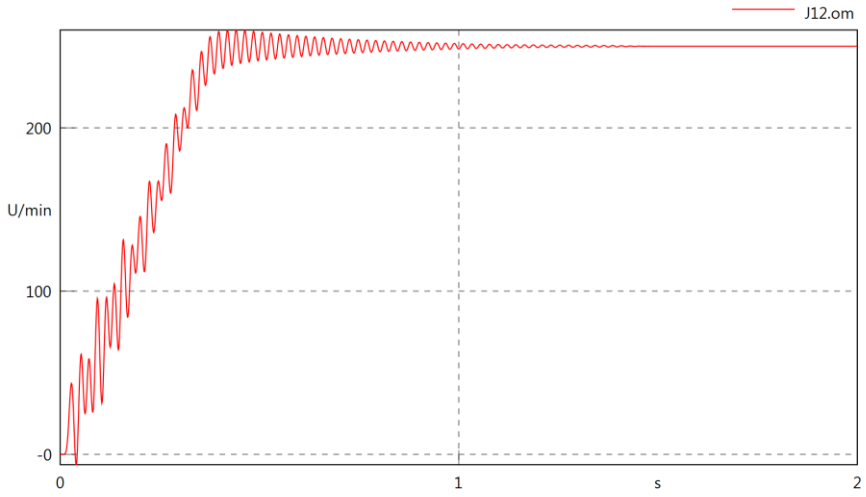


Рис. 7. Угловая скорость двенадцатого диска

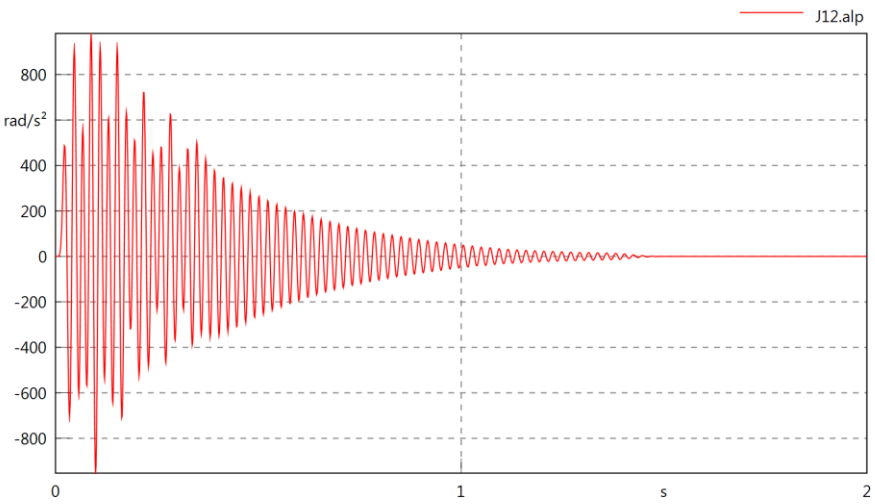


Рис. 8. Угловое ускорение двенадцатого диска

Заключение

Построенная динамическая модель ткацкого станка СТБ на программном комплексе SimulationX позволяют учитывать зазоры в соединениях и узлах, силы сопротивления и характеристики электродвигателя. Необходимые результаты можно получить в графическом виде и провести автоматический анализ собственных частот и форм колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнаутов П.Н., Варнаков М.Я. Ткацкие автоматические станки СТБ. М: Легкая индустрия, 1972. - 216 с.
2. Уалиев Г.У, Джомартов А.А.. Динамика механизмов ткацких станков-автоматов СТБ. Алматы: Тауар, 2003. - 377 с.
3. Вульфсон И.И. Динамические расчеты цикловых механизмов. – Л.: Машиностроение, 1976. - 328 с.
4. Сайт фирмы ITI GmbH (разработчик SimulationX) - **http://www.simulationx.com/**
5. Manual Simulation 3.5. - Dresden ITI GmbH, 2011.
6. ITI GmbH: ITI SimulationX 3.5 Help, COM Interface Documentation, 2011
7. Джолдасбеков У.А., Уалиев Г.У. Совершенствование мехагизмов прокладывания утка на многоцветных ткацких станках СТБ. - М.: Легпромиздат, 1986. – 192 с.
8. Jomartov A. Dynamic of machine-automaton on base of timing diagram // Conference proceedings of the 15th ITI Symposium», Германия, Дрезден, 2012, pp 70-78.
9. H. Dresig, F. Holzweißig, Dynamics of Machinery. - Springer Berlin Heidelberg, 2010. - p.242

УДК 621.01

А. Н. Евграфов, Г. Н. Петров

ГЕОМЕТРИЯ И КИНЕМАТИКА МЕХАНИЗМА ТУРБУЛЕНТНОГО СМЕСИТЕЛЯ



Александр Николаевич Евграфов, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)297-4845, E-mail: a.evgrafov@spbstu.ru.



Геннадий Николаевич Петров, к.т.н., доцент кафедры теории механизмов и маши, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)297-4845.

Аннотация

Рассмотрен шестизвенный пространственный механизм турбулентного смесителя с вращательными кинематическими парами. Показано, что одна из связей в шарнире является неосвобождающей. Выполнен геометрический и кинематический расчет механизма без избыточной связи.

Ключевые слова: пространственный механизм, избыточная связь, неосвобождающая связь, турбулентный смеситель, геометрический и кинематический расчет.

A.N. Evgrafov, G.N. Petrov

GEOMETRY AND KINEMATICS OF THE TURBULENCE MIXERS MECHANISM

Alexander N. Evgrafov[1], Gennady N. Petrov[1],
[1]St. Petersburg State Polytechnical University, Polytechnicheskaya, 29,
St-Petersburg, 195251, Russia, Phone: +7(812)297–4845

Abstract

This article considers the six-link spatial mechanism of turbulent mixer with six revolute kinematic pairs. It is shown that one of the constraints of revolute joint is a non-releasing one. This article presents geometric and kinematic calculations of a mechanism without an excessive constraint.

Key words: spatial mechanism, excessive constraint, non-releasing constraint, turbulent mixer, geometric and kinematic analysis.

Расчет рычажных механизмов, не содержащих избыточных связей, достаточно хорошо изучен и описан в обширной литературе (см., напр., [1–6, 11]). Однако большинство рычажных механизмов имеет избыточные связи. Наличие избыточных связей приводит к увеличению числа неизвестных, но не увеличивает число возможных независимых уравнений. Это делает расчёт таких механизмов невозможным. Один из возможных путей решения проблемы — отыскание и устранение избыточных связей. В этом случае геометрия и кинематика механизма не изменится, а сам механизм становится статически определимым. Для плоских механизмов отыскание избыточных связей не представляет трудностей, поскольку в этих механизмах избыточные связи — такие, которые не дают возможности звеньям механизма выйти из плоскости их движения (неосвобождающие связи [7]). В пространственных рычажных механизмах отыскание избыточных связей сложнее. В предлагаемой работе рассмотрен поиск избыточных связей и последующий геометрический и кинематический расчет пространственного шестизвенного механизма турбулентного смесителя.

На рис. 1 изображён турбулентный смеситель, предназначенный для смешивания до однородного состояния сухих сыпучих порошков или жидкостей. Движение от двигателя передаётся на входной вал 1, вилку 2, колбу 3, далее на вилку 4 и выходной вал 5. Смешивание происходит в колбе 3. Схема смесителя похожа на схему шарнира Гука (простого шарнира Кардана), в котором крестовиной является колба 3, но оси вращения в ней не пересекаются, а перекрещиваются под прямым углом, а входной и выходной валы параллельны.

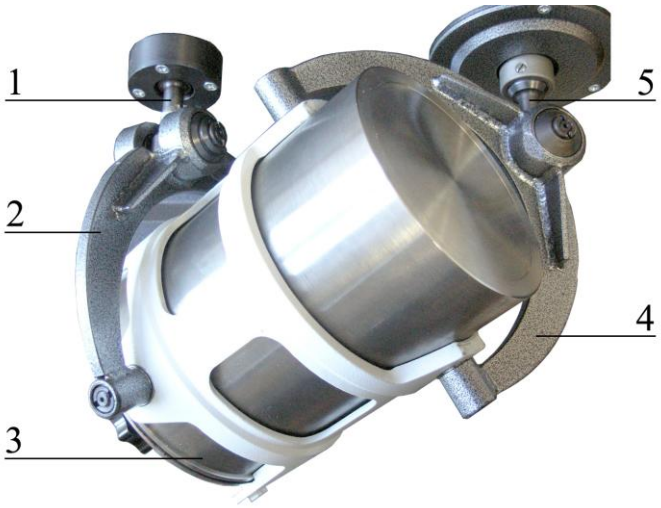
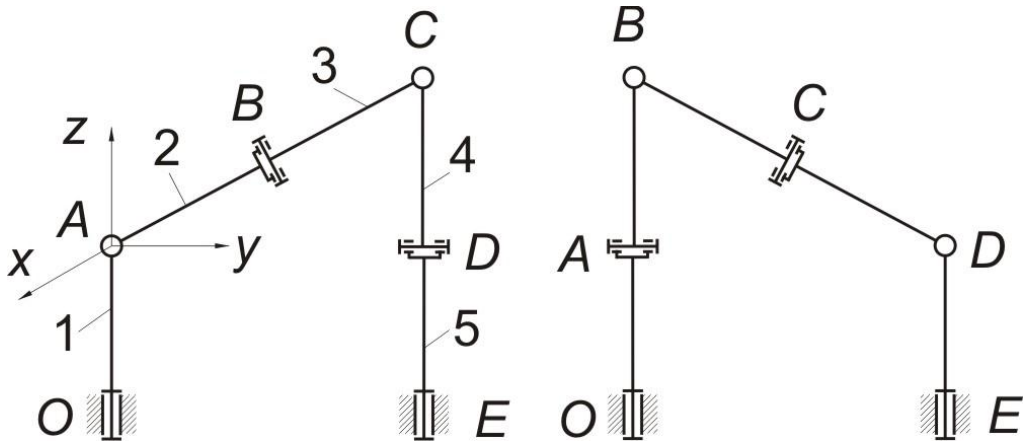


Рис. 1

В двух положениях звенья такого механизма располагаются в одной плоскости (рис. 2, а, б). С помощью пакета «Model Vision» создана 3-D анимация шестизвенника [8]. Произвольное положение звеньев показано на рис. 3. Исследованию геометрии и кинематики пространственного шестизвенника посвящена работа [9]. Число подвижных звеньев кинематической цепи $N=5$, число одноподвижных пар $p_1=6$, степень подвижности $W=6N-5p_1=0$. В работе [10] показано, что кинематическая цепь становится одноподвижным механизмом (т.е. одна из связей становится избыточной) при выполнении следующих условий:



а) *б*)

Рис. 2

- Оси соседних шарниров взаимно перпендикулярны,
- $AB=BC=CD=L$, (1)
- $AD=L\sqrt{3}$.

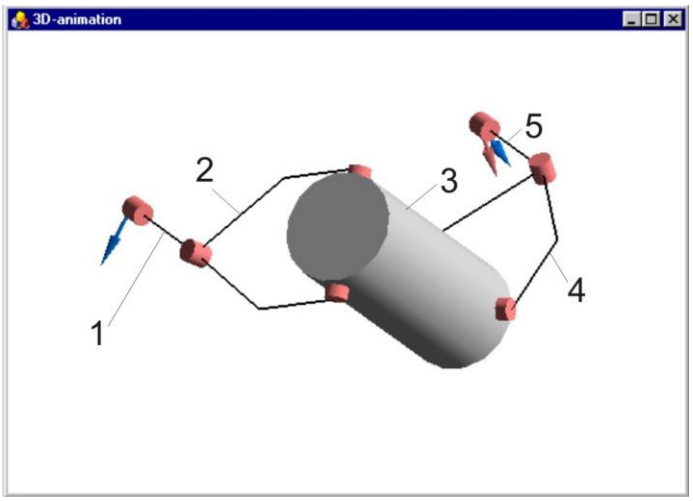


Рис. 3

Определим связи, которые являются неосвобождающими, то есть которые можно отбросить при геометрическом анализе механизма. В качестве примера исследуем связи шарнира D.

Разомкнем шарнир E. Свяжем с каждым из звеньев локальную систему координат (ЛСК), направляя z_i по осям соответствующих шарниров. Введем относительные углы поворота звеньев $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$ (φ_i – угол поворота i-го звена относительно $i-1$). На рис. 4 показано положение открытой кинематической цепи (ОКЦ) при $\varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = \varphi_5 = 0$ и значении входной координаты $q = 0$ (угол поворота первого звена относительно стойки). Потребуем, чтобы для данной ОКЦ выполнялись условия (1):

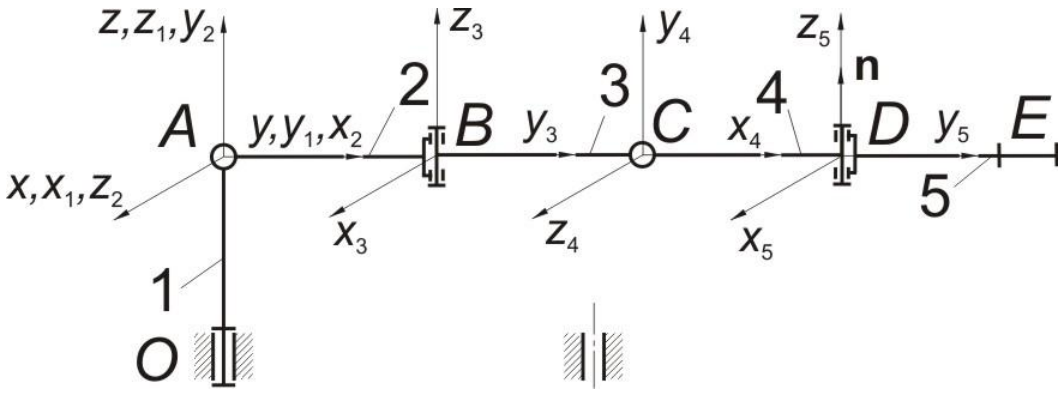


Рис. 4

$$R_D^{(0)} = H_R(q) H_{12^*} H_R(\varphi_2) H_{23^*} H_R(\varphi_3) H_{34^*} H_R(\varphi_4) R_D^{(4)}, \qquad (2)$$

где $R_D^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 \\ L\sqrt{3} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ – координаты точки D в мировой системе координат xyz,

$R_D^{(4)} = \begin{bmatrix} L \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ – координаты точки D в четвертой ЛСК,

$H_R(\varphi_i) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_i) & -\sin(\varphi_i) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_i) & \cos(\varphi_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица перехода для вращательной КП

$H_{i,i+1^*}$ – матрица перехода от начального положения $i+1$-й ЛСК к i-й ЛСК:

$$H_{12^*}=\begin{bmatrix}0&0&1&0\\1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix},\ H_{23^*}=\begin{bmatrix}0&1&0&L\\0&0&1&0\\1&0&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix},H_{34^*}=\begin{bmatrix}0&0&1&0\\1&0&0&L\\0&1&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix},H_{45^*}=\begin{bmatrix}0&1&0&L\\0&0&1&0\\1&0&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \quad (3)$$

Запишем уравнение (2) во второй ЛСК:

$$R_D^{(2)}=H_R^{-1}(\varphi_2)H_{12^*}^{-1}H_R^{-1}(q)R_D^{(0)}=H_{23^*}H_R(\varphi_3)H_{34^*}H_R(\varphi_4)R_D^{(4)}, \quad (4)$$

где $R_D^{(2)}$ — координаты точки D во второй ЛСК.

Раскрывая уравнение (4), получаем систему из трех уравнений с тремя неизвестными ($\varphi_2,\varphi_3,\varphi_4$):

$$\begin{cases}\cos(\varphi_3)\cdot(\cos(\varphi_4)+1)+1=\sqrt{3}\cdot\cos(\varphi_2)\cdot\cos(q)\\ \sin(\varphi_4)=-\sqrt{3}\cdot\sin(\varphi_2)\cdot\cos(q)\\ -\sin(\varphi_3)\cdot(\cos(\varphi_4)+1)=\sqrt{3}\cdot\sin(q)\end{cases} \quad (5)$$

Решение этих уравнений можно записать в виде:

$$\cos(\varphi_2)=\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos(q),\qquad \sin(\varphi_2)=M\cdot\frac{\sqrt{1+3\sin^2(q)}}{2},$$
$$\cos(\varphi_3)=\frac{1-3\sin^2(q)}{1+3\sin^2(q)},\qquad \sin(\varphi_3)=-\frac{2\sqrt{3}\sin(q)}{1+3\sin^2(q)}, \quad (6)$$
$$\cos(\varphi_4)=\frac{3\sin^2(q)-1}{2},\qquad \sin(\varphi_4)=-M\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos(q)\cdot\sqrt{1+3\sin^2(q)},$$

$M=\pm1$ — конфигурация разомкнутой КЦ.

Покажем, что связь, которую накладывает шарнир D на относительный поворот четвертого и пятого звеньев вокруг оси x_5 является неосвобождающей. Для этого введём в рассмотрение единичный вектор $\bar{n}$, совпадающий с осью шарнира z_5. Если связь неосвобождающая, то этот вектор всегда будет находиться в горизонтальной плоскости xy, то есть иметь нулевые проекции на ось z при любом q для решений (6) системы уравнений (5).

$$A_{12^*}=\begin{bmatrix}0&0&1\\1&0&0\\0&1&0\end{bmatrix},A_{23^*}=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\1&0&0\end{bmatrix},A_{34^*}=\begin{bmatrix}0&0&1\\1&0&0\\0&1&0\end{bmatrix},A_{45^*}=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\1&0&0\end{bmatrix}.$$

Выделим в матрицах перехода (3) матрицы направляющих косинусов:

Так как плоскость xy совпадает с плоскостью x_1y_1, запишем проекции вектора $\bar{n}$ в первой ЛСК:

$$r_n^{(1)} = A_{12^*} A_R(\varphi_2) A_{23^*} A_R(\varphi_3) A_{34^*} A_R(\varphi_4) A_{45^*} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \sin(\varphi_3)\cdot\sin(\varphi_4) \\ -\cos(\varphi_2)\cdot\cos(\varphi_3)\cdot\sin(\varphi_4) - \sin(\varphi_2)\cdot\cos(\varphi_4) \\ -\sin(\varphi_2)\cdot\cos(\varphi_3)\cdot\sin(\varphi_4) + \cos(\varphi_2)\cdot\cos(\varphi_4) \end{bmatrix},$$

где $A_R(\varphi_i) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_i) & -\sin(\varphi_i) & 0 \\ \sin(\varphi_i) & \cos(\varphi_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ — матрица поворота относительно оси z_i.

Учитывая (6), определим проекции вектора $\bar{n}$ на ось z_1:

$$n_z = -\sin(\varphi_2)\cdot\cos(\varphi_3)\cdot\sin(\varphi_4) + \cos(\varphi_2)\cdot\cos(\varphi_4) = -M\cdot\frac{\sqrt{1+3\sin^2(q)}}{2}\cdot\frac{1-3\sin^2(q)}{1+3\sin^2(q)}\cdot$$

$$\cdot\left(-M\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos(q)\cdot\sqrt{1+3\sin^2(q)}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos(q)\cdot\frac{3\sin^2(q)-1}{2} = 0$$

Очевидно, что связь, которую накладывает шарнир D на относительный поворот четвертого и пятого звеньев вокруг оси y_5, является освобождающей. Ее удаление приведет к появлению дополнительной степени подвижности (дополнительный поворот пятого звена вокруг вертикальной оси). Среди связей, которые накладывает шарнир D на линейные перемещения, освобождающей является связь, устранение которой не приводит к изменению условия (1) $AD = L\sqrt{3}$.

Определим разность углов поворота выходного (пятого) и входного (первого) звеньев

$$\Delta = \varphi - q \tag{7}$$

Очевидно, что проекции вектора $\bar{n}$ на оси x_1 и y_1 дадут значения косинуса и синуса этого угла:

$$\cos(\Delta) = \sin(\varphi_3)\cdot\sin(\varphi_4),$$

$$\sin(\Delta) = -\cos(\varphi_2)\cdot\cos(\varphi_3)\cdot\sin(\varphi_4) - \sin(\varphi_2)\cdot\cos(\varphi_4)$$

Подставим (6), получаем

$$\cos(\Delta) = M\cdot\frac{3\sin(q)\cos(q)}{\sqrt{1+3\sin^2(q)}},\quad \sin(\Delta) = M\cdot\frac{1-3\sin^2(q)}{\sqrt{1+3\sin^2(q)}}. \tag{8}$$

Входное и выходное звенья вращаются в противоположные стороны, поэтому угол поворота пятого звена представим в виде

$$\varphi = -(q+\psi)\ , \tag{9}$$

где ψ – отклонение выходной координаты φ от закона движения входной координаты.

Подставим (9) и (7) в (8):

$$\cos(-2q-\psi) = M \cdot \frac{3\sin(q)\cos(q)}{\sqrt{1+3\sin^2(q)}}.$$

Возьмем производную от этого выражения по времени:

$$(-2\dot{q}-\dot{\psi})\cdot\sin(\Delta) = M \cdot \frac{3\cdot\left(1-2\sin^2(q)-3\sin^4(q)\right)}{\left(1+3\sin^2(q)\right)^{3/2}}\cdot\dot{q}$$

Определим соотношение $\frac{\dot{\psi}}{\dot{q}}$:

$$\frac{\dot{\psi}}{\dot{q}} = \frac{1-3\cdot\sin^2(q)}{1+3\cdot\sin^2(q)}.$$

Экстремальные значения:

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\dot{q}}\right)_{\max} = 1 \quad \text{при} \quad q = 0+\pi\cdot k,$$

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\dot{q}}\right)_{\min} = -\frac{1}{2} \quad \text{при} \quad q = \frac{\pi}{2}+\pi\cdot k, \quad (k = 1,2\ldots).$$

Коэффициент δ неравномерности вращения выходного звена, вызванный геометрией механизма, составляет:

$$\delta = \left(\frac{\dot{\psi}}{\dot{q}}\right)_{\max} - \left(\frac{\dot{\psi}}{\dot{q}}\right)_{\min} = 1,5.$$

Полученный результат показывает, что работа механизма смесителя возможна лишь на сравнительно малых скоростях из-за больших инерционных нагрузок.

В заключении отметим, что избыточная связь рассмотренного шестизвенника появляется лишь при соблюдении условий (1). При неточности изготовления звеньев и кинематических пар работа подобного механизма возможна только за счет зазоров в КП или упругости элементов КП и звеньев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория механизмов и машин: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений /М.З.Коловский, А.Н.Евграфов, Ю.А.Семенов, А.В.Слоущ. – 3-е изд., испр. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 560 с.

2. Диментберг Ф.М. Теория пространственных шарнирных механизмов. – М.: Наука, 1982. – 336 с.
3. Зиновьев В.А. Пространственные механизмы с низшими парами. – М.: Гостехиздат, 1952. – 432 с.
4. Мерцалов Н.И. Теория пространственных механизмов. – М.: Гостехиздат, 1951. – 206 с.
5. Мудров П.Г. Пространственные механизмы с вращательными парами. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1976. – 264 с.
6. Петров Г.Н. Алгоритм кинетостатического расчета на ЭВМ замкнутых рычажных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1993. № 3.
7. Евграфов А.Н. Теория механизмов и машин: учеб. пособие / А.Н. Евграфов, М.З. Коловский, Г.Н. Петров. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 248 с.
8. Петров Г. Н. Компьютерное моделирование механических систем в среде «Model Vision» // Теория механизмов и машин. – 2004. – №1(3). – Т. 2. – С. 75–79.
9. Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терешин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2011. – №2(123). – С. 170–176.
10. Овакимов А.Г. Анализ пассивной связи пространственного шестизвенного механизма с вращательными парами. // Известия вузов СССР. Машиностроение. – М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1970. – №2. – С. 58–61.
11. Uicker J.J. Velocity and Acceleration Analysis of Spatial Mechanisms Using 4x4 Matrices. – Northwestern Univers., the Technolog. Inst. Evanston, Illinois, 1963.
12. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York, 2000. 394 p.

УДК 621.82/.85

Д. Ю. Ершов

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ВИБРЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ПРИ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ



Дмитрий Юрьевич Ершов, к.т.н., доцент
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7-921-598-24-62, E-mail: fetcat@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы возникновения и влияния технологических погрешностей изготовления деталей механических систем на вибрационные характеристики системы при ее эксплуатации. Приведено математическое описание различных технологических погрешностей для их дальнейшего моделирования и изучения.

Ключевые слова: технологические погрешности, вибрация, ряд Фурье, формулы Бесселя, деформация, остаточные напряжения.

D. Ershov

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL ERRORS MANUFACTURE OF NODES OF A MECHANICAL SYSTEM ON THE VIBRATION CHARACTERISTICS OF THE SYSTEM WHEN IT IS OPERATING

Dr. Dmitriy Ershov, National Mineral Resources University, Russia,
e-mail: fetcat@mail.ru

Abstract

In article are considered questions of occurrence and the impact of technological errors manufacture of parts of mechanical systems on the vibration characteristics of the system during its operation. Provides a mathematical description of various technological errors for their further modeling and study.

Key words: technological errors, vibration, Fourier series, formula Bessel, deformation, residual stresses.

Важным фактором возникновения суммарного вибрационного воздействия в узлах механических систем являются технологические погрешности изготовления деталей механизмов.

Технологический процесс изготовления детали с высокими показателями качества - точности и прочности - является чрезвычайно сложным и затруднительным. Например, в процессе химико-термического упрочнения теряется точность, достигнутая в предыдущих операциях механической обработки, а при достижении требуемой точности при механической обработке после упрочнения снимается наиболее качественный слой, возникают неблагоприятные остаточные напряжения, то есть снижается прочность и твердость рабочих контактирующих поверхностей.

Кроме того, для обеспечения достаточного качества функционирования деталей машин необходимо знание относительного влияния отдельных элементов конструкций друг на друга, механической обработки, свойств материала и способов упрочнения поверхностного слоя на точность изготовления деталей, а также необходимо иметь надежные методы расчета и прогнозирования точностных показателей качества изделия.

В технологии изготовления деталей, точность которых характеризуется многими сложными параметрами (зубчатые колеса), операции термической и химико-термической обработки вызывают наибольшее количество технологических погрешностей [1]. Главные источники таких погрешностей следующие:

- неодинаковое абсолютное изменение линейных размеров и объема разных частей детали при тепловом расширении (сжатии) из-за различных размеров и массы сопряженных элементов детали;
- недостаточная жесткость детали, приводящая к прогибам под действием собственной силы тяжести в процессе нагрева при цементации и закаливании;
- фазовые превращения:
  - изменение удельного объема сердцевины детали;
  - изменение удельного объема поверхностного слоя детали;
  - проявление аномально высокой обратимой пластичности материала;
  - изменение глубины и объема цементированного слоя на поверхностях различной кривизны;
- погрешности размеров и формы деталей после механической обработки перед упрочнением.

В практике термической обработки принято погрешности деталей разделять на два вида [2]:

1. погрешности, вызванные изменением удельного объема стали, при фазовых превращениях, что приводит главным образом к изменению

размеров детали с примерным сохранением подобия геометрической формы до термообработки и после нее;

2. погрешности, вызванные тепловыми и структурными напряжениями, что приводит к искажению формы поверхностей, искривлению прямолинейных осей, относительному смещению отдельных элементов детали, неравномерному изменению линейных размеров.

Все это приводит к изменению диаметральных и осевых размеров, к искажению формы детали. Погрешности размеров и формы деталей после механической обработки суммируются с указанными выше погрешностями. Некоторую долю в суммарную погрешность вносят погрешности размеров, возникающие от напряженного состояния металла перед упрочнением. В значительной степени на такое состояние металла влияют вид и режимы механической обработки и предварительная термическая обработка.

Существенное влияние на точностные показатели качества оказывает конструкция детали. После рассеяния погрешностей деталей сложной формы (например, фасонное колесо) в 3,2 раза больше, чем у колес простой и жесткой конструкции (монолитное колесо), хотя размеры деталей одинаковы [1].

Существенный вклад в суммарные погрешности размеров и формы деталей вносят отдельные операции химико-термического упрочнения. Нормализация и цементация влияют, главным образом, на погрешности формы. Поле рассеяния погрешностей на операции нормализации самое большое. Это приводит к нестабильности размеров после упрочнения. Поэтому чтобы обеспечить требуемую точность размеров и формы деталей необходимо выбрать такой режим химико-термического упрочнения, который обеспечит требуемые прочностные показатели без нормализации. При ступенчатой закалке без нормализации погрешность примерно в 1,5 раза меньше [1].

Влияние на погрешности детали в процессе упрочнения оказывают химический состав и физическое состояние металла [2]. Например, с увеличением содержания углерода увеличивается объем металла после закалки. Различное содержание легирующих элементов в стали, приводит к изменению формы (короблению) детали. Погрешности формы и размеров детали при механической обработке суммируются с погрешностями, вызванными упрочнением. При этом существенное влияние оказывают остаточные напряжения. В отдельных случаях погрешности формы, вызванные нагревом детали с повышенными остаточными напряжениями, увеличиваются почти в 2 раза по сравнению с соответствующими погрешностями, измеренными до нагрева [3].

При изготовлении деталей типа тел вращения в различных условиях производства одним из важнейших технологических факторов, наиболее существенно влияющих на их качественные показатели, является

погрешность базирования на разных операциях технологического процесса. Детали должны быть ориентированы определенных образом относительно координат станка и режущего инструмента. Эта ориентация осуществляется при помощи базирования.

При базировании заготовок на каждой технологической операции необходимо не допустить образования новых или увеличения и преобразования существующих погрешностей и уменьшить погрешности, образовавшиеся на предыдущих операциях.

Погрешность формы цилиндрической детали определяется величиной отклонения реального профиля от номинального, в качестве которого принимается базовая окружность. Величина отклонения от округлости определяется положением этой окружности. Для совершенно одинаковых поверхностей отклонения от округлости оценивается значениями, отличающимися друг от друга на 10-15% и более. Существует методика определения отклонения от округлости, в которой за базовую принимают среднюю окружность, проведенную относительно реального профиля по способу наименьших квадратов [4]:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n} (r_i - r_0)^2 = min \qquad (1)$$

Радиус средней окружности r_0 определяется как среднее значение текущих радиусов r_i реального профиля, измеренного в n точках:

$$r = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} r\varphi d\varphi \text{ или } r_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} r_i \qquad (2)$$

где φ - аргумент функции.

Средняя окружность как база для отсчета отклонения формы позволяет получить наиболее однозначные и надежные результаты. Координаты центра средней окружности меняются даже при незначительных изменениях реального профиля, относительно которого она проведена. С уменьшением погрешностей формы профиля до нуля, он совпадает со средней окружностью.

Отклонения формы и положения поверхностей вращения составляют радиальное биение. Реальный профиль поверхности вращения в поперечном сечении при изменении радиального биения можно представить в виде периодической функции с периодом 2π, непрерывной и отвечающей признаку Дирихле. Эмпирическую периодическую функцию, определяющуюся графиком радиального биения при любом фиксированном значении аргумента, можно представить в виде тригонометрического полинома ряда Фурье:

$$f(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi) \qquad (3)$$

где $\frac{a_0}{2}$ - постоянный член ряда; a_k, b_k - коэффициенты ряда Фурье; φ - дискретные значения угла поворота детали при измерении; k - номер гармоники.

Поскольку график радиального биения технологической базы представляет собой функцию, заданную частными дискретными значениями, для определения характеристик ряда используются формулы Бесселя:

$$a_k = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} \Delta_N \cos k\varphi$$

$$b_k = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} \Delta_N \sin k\varphi$$

$$a_0 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} \Delta_N \qquad (4)$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

$$tg\alpha_k = \frac{b_k}{a_k}$$

где N - число измерений; A_k - амплитуда соответствующей гармоники; α_k - фазовый угол; Δ_N - показания прибора при измерении.

Амплитуда и фаза первой гармоники (k=1) определяют в полярных координатах величину и угловое положение эксцентриситета оси вращения при измерении. Совокупность гармоник второго и последующих высших порядков отражают характер изменения формы в пределах средней окружности, и позволяет установить ее числовое значение.

При анализе формы технологической базы наиболее целесообразно применять зависимость, позволяющую непосредственно исключать эксцентриситет из графика радиального биения:

$$\Delta_П = \Delta_N - e_{CT}\left[\cos(\alpha - \varphi) + 1\right] \qquad (5)$$

где $\Delta_П$ - действительные значения погрешности формы технологической погрешности формы технологической базы в каждой измеренной точке; $e_{CT} = A_1$ - эксцентриситет, определяемый путем разложения эмпирической функции в ряд Фурье; α - угол направления эксцентриситета; φ - переменное значение угла поворота детали при измерении радиального биения. Положение средней окружности относительно реального профиля определяется согласно выражениям (4).

Рассмотрим, для примера, математическое описание технологических погрешностей подшипников [4].

При изготовлении элементов шарикоподшипников: колец, тел качения, сепаратора - допускаются отклонения размеров и формы рабочих

поверхностей. Допускаемые отклонения размеров и формы определяются классами точности и изготовления подшипников.

Поверхности беговых дорожек колец представляют собой отклонения от правильной геометрической формы и являются 2π - периодическими функциями угла. Рассматриваемые функции, заданные в промежутке от 0 до 2π удовлетворяют условию Дирихле и могут быть представлены в виде тригонометрического ряда Фурье:

$$R = R_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\varphi + \varphi_0) \tag{6}$$

где k - номер или порядок гармоники; R_0 - средний радиус - вектор кольца; φ_0 - фазовый угол, определяющий положение k - ой гармоники относительно начала отсчета (k=2 - овальность, k=3 - трехгранность); A_k - коэффициенты разложения в ряд Фурье, определяющие амплитуды отклонений на соответствующих гармониках.

Технологические погрешности шариков оцениваются их разноразмерностью:

$$\Delta d = d_i - d_{cp} \tag{7}$$

где d_{cp} - средний диаметр шариков в комплекте; d_i - диаметр i - го шарика.

Отклонения формы шариков определяются двумя углами ξ и ψ, расположенными в ортогональных плоскостях:

$$d_i = d_{cp} + \sum_{k=1}^{\infty} d_k \cos(k\xi + \psi) \tag{8}$$

где d_k - коэффициенты ряда Фурье, их можно рассматривать как стационарные случайные функции с нормальным законом распределения.

При изготовлении поверхностей роторов и статоров в поперечном и продольном направлениях могут быть отклонения от правильной геометрической формы или отклонения от номинальных размеров в пределах технологического допуска.

Отклонения рабочей поверхности ротора, статора от правильной геометрической формы может быть описано в виде тригонометрической функции ряда Фурье:

$$B = B_0 + \sum_{k=2}^{\infty} A_k \cos(k\varphi + \varphi_0) \tag{9}$$

где B_0 - средний радиус поверхности ротора, статора, коллектора; A_k - амплитуда гармоник; k - номер или порядок гармоники.

Погрешности изготовления подшипников и сборки элементов механических систем приводят к возникновению возмущающих сил.

В подшипниках при действии нагрузки в точках контакта шариков с кольцами возникают усилия, направленные по нормали к поверхности касания [5].

$$F_i = B\delta_i^{\frac{3}{2}} e(\delta_i) \quad (10)$$

где F_i - сила, действующая на i - ый шарик со стороны кольца; B - конструктивный параметр, определяемый упругими характеристиками шарикоподшипника; δ_i - деформация контактирующих тел; $e(\delta_i)$ - функция, учитывающая контакт каждого шарика с кольцами. Каждый шарик находится в контакте с кольцами небольшой промежуток времени, в этот момент имеет место деформация контактирующих тел, то есть $\delta_i>0$, затем шарик выходит из зоны контакта, и деформация становится равной нулю ($\delta_i=0$).

Деформация определяется сближением контактирующих тел и определяется следующим выражением:

$$\delta_i = x\cos\psi_i + y\sin\psi_i - \frac{\Delta_з}{2} + \Delta h\cos\alpha_i \quad (11)$$

$$\Delta h = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\psi_k + \varphi_k) \quad (12)$$

где x, y - перемещения ротора в подшипниках; $\Delta_з$ - радиальный зазор в подшипнике; ψ_i - угол, характеризующий положение i - го шарика; α_i - угол контакта i - го шарика с кольцами; A_k, φ_k - амплитуда и фазовый угол k - ой гармоники.

В узлах механических систем при их производстве образуются технологические погрешности с локальной структурой, не оказывающие влияния на ресурс работы изделия, и создаются концентрации вибрационных воздействий, которые служат условиями последующего формирования локальных дефектов.

Погрешности настройки и периодические сбои технологического оборудования полностью на производстве исключить невозможно. Даже применение сверхточных измерительных устройств не позволяет исключить определенные погрешности, поскольку точность устройств, применяемых при наладке, определяется установленным полем допуска. Сбои оборудования и погрешности оператора в определенный момент времени могут оказаться на величине суммарной погрешности настройки. Погрешности настройки, например, могут привести к увеличению усилия резания в процессе механической обработки детали. В результате создается дополнительная динамическая нагрузка, действующая на обрабатываемую деталь. При повышении этой нагрузки допустимого значения, происходит деформация поверхностного слоя материала заготовки, образуются структуры, обладающие неодинаковым объемом. При дальнейшем увеличении плотности концентрации вибрационных воздействий это обстоятельство может привести к образованию слабо различимых раковин и вмятин на поверхностях деталей. Деформация поверхностного слоя приводит к возникновению остаточных напряжений в

поверхностных слоях материала, которые исчезают после сборки изделия при отсутствии каких-либо внешних нагрузок. Внутренние напряжения также возникают вследствие литейной усадки, неравномерной пластической деформации, термической обработки и механической обработки детали. Внешне эти напряжения ничем и никак не проявляются, деталь может быть напряжена почти до границ разрушения, но по внешнему виду не отличается от детали, свободной от внутренних напряжений.

Для предотвращения опасного состояния материала необходимо, чтобы выполнялось следующее условие: остаточные напряжения в материале детали изделия должны быть меньше допустимого напряжения для данной марки материала.

Практически невозможно изготовить детали с идеально гладкими поверхностями и, таким образом, даже при самых малых нагрузках на отдельных микронеровностях поверхности всегда возникают напряжения, приводящие к пластическим деформациям. Концентрация напряжений при превышении допустимого напряжения создает условия для формирования локальных дефектов.

Напряжения, создаваемые в процессе механической обработки (токарная обработка и предварительное шлифование), должны быть сняты до окончательной обработки или в период ее проведения.

Методы неразрушающего контроля не позволяют фиксировать слабые технологические погрешности. Их возникновение связано с ненаблюдаемым параметром - случайными остаточными напряжениями. Они могут быть выявлены с помощью других новых современных методов диагностирования технического состояния механической системы на этапе приемо-сдаточных испытаний.

Таким образом, технологические погрешности изготовления и сборки узлов механических систем, а также контактные напряжения, возникающие при выполнении различных операций технологического процесса изготовления деталей системы являются весьма существенным факторами, влияющими на виброактивность системы в целом и требуют глубокого изучения и создания определенных методов их диагностирования еще на этапе проектирования механической системы и перед запуском ее в эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин / В.П. Пономарев [и др.]; - М.: Машиностроение, 1984, - 184 с.
2. Технологические аспекты бездефектного шлифования деталей с покрытиями / Д.Е. Апельчик [и др.]; - М.: Машиностроение, 1991.-56 с.

3.Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Г.К. Горанский [и др.]; под ред. Г.К. Горанского. - М.: Машиностроение, 1969, - 240 с.
4. Справочник конструктора точного приборостроения / Под ред. К.Н.Явленского и Е.Е.Чаадаевой. - Л.: Машиностроение, 1989, - 790 с.
5. Явленский А.К., Явленский К.Н. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. - Л.: Машиностроение, 1983, - 239 с.

УДК 62-115

В.В. Жога, А.Е. Гаврилов, В.А. Шурыгин,
А.С. Даншин, Д.В. Голубев

МОБИЛЬНЫЙ ШАГАЮЩИЙ РОБОТ ЛЕГКОГО КЛАССА



Виктор Викторович Жога, д.ф.-м.н., профессор, Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград, 400131, пр. Ленина 28,
тел. (8442) 24-80-99, E-mail: zhoga@vstu.ru



Андрей Евгеньевич Гаврилов, ст. преподаватель, Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград, 400131, пр. Ленина 28,
тел. (8442) 24-80-99, E-mail: krobotech@gmail.com



Виктор Александрович Шурыгин, д.т.н, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград, 400131, пр. Ленина 28,
тел. (8442) 24-81-53



Александр Сергеевич Даншин, инженер, Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград, 400131, пр. Ленина 28, тел. (8442) 24-80-99



Денис Викторович Голубев, инженер, Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград, 400131, пр. Ленина 28, тел. (8442) 24-80-99
E-mail: denisgolubev21@rambler.ru

Аннотация.

В работе обосновывается актуальность создания мобильных роботов, рассматривается шагающий робот легкого класса, приводятся основные алгоритмы пространственного перемещения мобильного робота использующего для передвижения шагающий ортогональный движитель. На примере ранее созданного робота с ортогональным движителем, рассматриваются основные достоинства и недостатки ортогональных машин легкого класса.

Ключевые слова: ортогональный движитель, шагающий робот, мобильная платформа.

V.V. Zhoga, A.E. Gavrilov, V.A. Shurygin, A.S. Danshin, D.C. Golubev

LIGHT CLASS MOBILE WALKING ROBOT

Victor V. Zhoga[1], e-mail: zhoga@vstu.ru;
Andrey E. Gavrilov[1], e-mail: krobotech@gmail.com;
Victor A. Shurygin[1], phone: 8442-24-81-53;
Alexandr S. Danshin[1], phone: 8442-24-80-99;
Denis V. Golubev[1], e-mail: denisgolubev21@rambler.ru.
[1]Volgograd State Technical University, Russia

Abstract

In the paper, the relevance of the robots, mobile walking robot is considered an easy class, the basic algorithms for spatial movement of mobile robot is used to move walking orthogonal propeller. On the example of a previously created a robot with orthogonal propeller, are considered the main advantages and disadvantages of orthogonal light class vehicles.

Key words: orthogonal propeller, walking robot, a mobile platform.

Существует необходимость создания средств автоматизации для применения в различных сферах человеческой деятельности, с целью повышения производительности труда, снижения стоимости работ в условиях трудной доступности и повышенной опасности[1]. Одним из приоритетных направлений является создание мобильных автономных робототехнических систем различного класса и назначения. Применение высокотехнологичных энерго- и ресурсосберегающих робототехнических систем для проведения различных работ позволяет существенно увеличить производительность труда, а также уменьшить риски получения производственных травм и возникновения у людей связанных с опасным и вредным производством тяжелых форм острых профессиональных поражений.

В ВолгГТУ на кафедре теоретической механики разрабатываются и исследуются машины и роботы использующие шагающий способ перемещения. За последние десятилетия были созданы шагающие машины «Восьминог», «Восьминог-М» использующие для перемещения цикловые шагающие движители, а также роботы использующие ортогональные движители «УмНик» и «Ортоног». В мобильном шагающем роботе «УмНик» в качестве механизма перемещения применяется ортогональный шагающий движитель[2]. Ортогональный движитель в сравнении с шагающими движителями других типов обладает преимуществом в энергетическом отношении, т.к. при его перемещении энергия не расходуется на поддержание собственного веса [3]. Фотография и компоновочная схема робота «УмНик» представлена на рис. 1.



Рис. 1. Мобильный робот «УмНик» с ортогональным движителем.

Наряду с преимуществами, в процессе эксплуатации были выявлены некоторые недостатки. Наиболее существенный из которых связан с наличием повышенных сил трения в направляющих горизонтального перемещения [4], что приводит к увеличению энергозатрат на перемещение. Повышенные силы трения в кинематических парах пятого класса возникают за счет выхода центра тяжести переносимой рамы за пределы конструктивных границ направляющей втулки, из-за чего реакции связи линейно возрастают.

Также при проектировании робота «УмНик» не было заранее предусмотрено пространство для установки аккумуляторных батарей повышенной емкости, что существенно снижало время автономной работы робота.

Эти недостатки учтены при проектировании мобильной робототехнической платформы малого класса (рис. 2)[5]. В качестве механизма шагания определен ортогональный механизм. Помимо выгоды в энергетическом отношении при использовании такого механизма, ортогональная схема движителя предъявляет минимальные
требования к системе управления, что не маловажно для робастности и автономности.

На основании исследования различных типов конструкций шагающих роботов, их движителей и систем управления, выявлены достоинства выбранного механизма, среди которых можно выделить надежность механизмов, исполнительные органы которых совершают поступательное движение; достаточность двух, независимо работающих приводов, осуществляющих курсовое движение и адаптацию к опорной поверхности; энергетическую эффективность, обусловленную отсутствием затрат энергии на поддержание веса машины; простые алгоритмы управления траекторией и законом движения опорной точки.

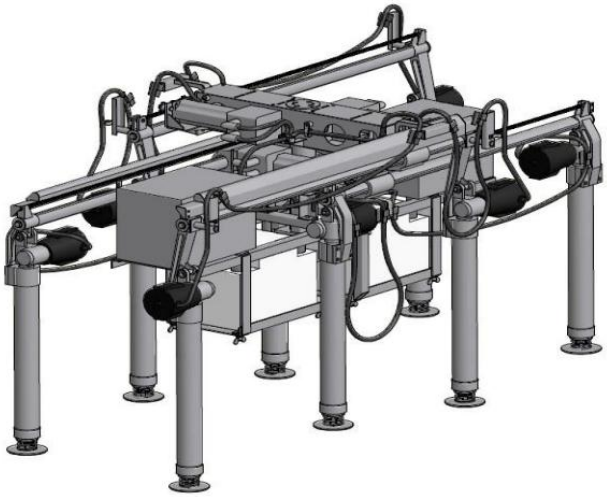


Рис. 2. Мобильная робототехническая платформа малого класса.

Схема мобильной платформы малого класса изображена на рис. 3. Платформа компонуется из модуля поворота, модулей вертикальной адаптации и горизонтального перемещения.

Корпус 1 состоит из верхней и нижней частей, на каждой закреплены пары направляющих, в которых, с возможностью горизонтального перемещения установлены подвижные рамы 2, связанные с приводами горизонтального перемещения. На концах рамы смонтированы выдвижные вертикальные опорные стойки 3, связанные с приводами вертикального перемещения (рис. 3).

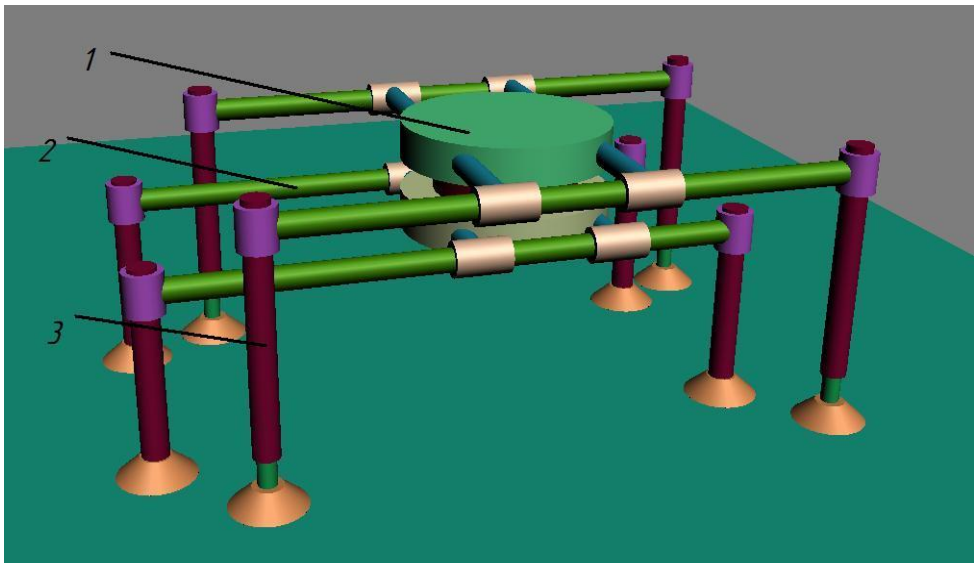


Рис. 3. Кинематическая схема мобильной шагающей платформы.
1 – поворотный корпус, 2 – модуль горизонтального перемещения, 3 – модуль вертикального перемещения (модуль адаптации).

При проектировании платформы использовался блочно-модульный принцип построения электромеханических структур [6]. Такой принцип

построения конструкции мобильной платформы с использованием стандартных функциональных мехатронных модулей, имеет значительные преимущества при разработке специализированных роботов, наиболее полно отвечающих требованиям решения конкретной задачи и не обладающих избыточной функциональностью.

В процессе работы по созданию платформы разработана математическая модель пространственного перемещения мобильной шагающей платформы по деформированной опорной поверхности [7]. Математическая модель позволяет решать задачи динамического анализа, проводить проверку допустимости упрощающих предположений при выборе динамических моделей различной сложности, используемых при решении частных задач - устойчивости, распределения реакций в опорах робота при задаваемых траекториях движения, а также определять энергозатраты на перемещение робота.

Перемещение центра масс является функцией движения частей робота. Так как у шагающей платформы приводы горизонтального, вертикального и углового перемещения разделены кинематически, робот имеет возможность двигаться по заданной траектории, используя различные алгоритмы. Схема возможных алгоритмов мобильного робота малого класса описываемого в статье идентична перемещениям робота «УмНик», с той разницей, что у робота «УмНик» четыре ноги объединены в одной раме. Ниже приведена схема старт-стопных алгоритмов перемещения (рис. 4) [8].

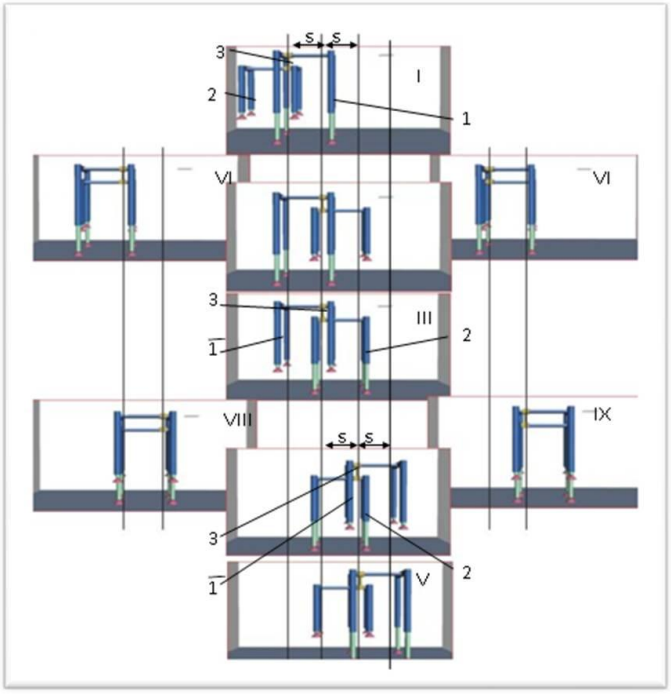


Рис. 4. Старт-стопный алгоритм перемещения

При установке на корпусе платформы грузоподъемного оборудования (манипулятора) кинематическая схема платформы позволяет обеспечить дополнительный запас устойчивости (рис. 5), за счет увеличенной площади опорного многоугольника.

Система управления мобильной платформой, помимо блоков реализации программного пространственного перемещения, содержит систему пространственной ориентации и навигации в автономном режиме при удалѐнном управлении. В системе используются возможности контроллера Kinect для обработки трехмерных изображений, лазерных дальномеров и блока мобильной связи на плате SK-AT91SAM9260-SIM508, в котором модуль SIM-508 в одном корпусе содержит GSM-модем и GPS-приемник. Модуль SIM-508 обеспечивает определение географических координат робота в пространстве, обмен SMS-сообщениями. Удаленная связь и управление реализуется с помощью GSM-модема.

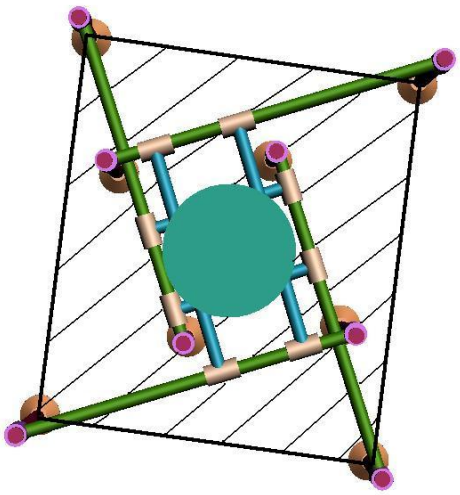


Рис. 5. Опорный многоугольник мобильной шагающей платформы малого класса.

При создании платформы использовались высокоточные модули перемещения производителей SKF и Maxon motors, обеспечивающие точность перемещения движущихся частей до 0,05 мм от заданного закона движения модуля. Ниже приведены основные технические характеристики платформы: масса – 184 кг, максимальная скорость -0,14 м/с, высота преодолеваемого препятствия – 400 мм, максимальный угол подъема 30°, габаритные размеры: длина 1290…2290 мм, ширина 764 мм, высота 857...1437 мм.

Созданная платформа может быть использована как транспортно технологическая машина с дистанционным супервизорным управлением. Применение таких платформ позволит обеспечить требуемую безопасность персонала в условиях повышенной опасности, в условиях вредных производств, при ликвидации последствий техногенных и природных катастроф, разборе завалов, выполнения работ гуманитарного разминирова-

ния, работ требующих точного позиционирования перемещаемых объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батанов А.Ф. Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций. Условия применения и общие технические требования / А.Ф. Батанов, С.Н. Грицынин, С.В. Муркин // Симпозиум по робототехнике и мехатронике. –М.: ИПМ РАН, 2008.–С. 37-66.
2. Пат. 2435693 РФ, МПК B62D57/032. Шагающий движитель повышенной проходимости / А.Е. Гаврилов, В.В. Жога, В.Е. Павловский, П.В. Федченков; ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2011.
3. Энергетика перемещения робота с ортогональным шагающим движителем / В.В. Жога, В.А. Шурыгин, А.Е. Гаврилов, В.Е. Павловский // Актуальные проблемы защиты и безопасности : тр. двенадцатой всерос. науч.-практ. конф. (1-3 апр. 2009 г.). В 6 т. Т. 5. Экстремальная робототехника / Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук, НПО спец. материалов. - СПб., 2009. - С. 202-205.
4. Гаврилов, А. Е. Синтез оптимального программного закона перемещения робота с ортогональными шагающими движителями / А.Е. Гаврилов, В.В. Жога, П.В. Федченков // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. - №5.-С. 164-173
5. Пат. 2476372 РФ, МПК B66C23/36, B60P3/00. Аварийно-спасательная машина / В.В. Жога, В.Н. Скакунов, А.В. Еременко, П.В. Федченков, В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов, ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2013.
6. Жога, В.В. Шагающий робот с ортогонально-поворотным движителем / В.В. Жога, А.Е. Гаврилов, П.В. Федченков // Матер. 7-й науч.-техн. конф. "Мехатроника, автоматизация, управление" (МАУ-2010), проводимой в рамках 3-й мультиконф. по проблемам управления (МКПУ-2010), 12-14 окт. 2010 г. / Гос. науч. центр РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ Электроприбор" [и др.]. - СПб., 2010. - С. 175-178.
7. Гаврилов, А.Е. Синтез оптимального по энергозатратам закона движения ортогонального шагающего робота / А.Е. Гаврилов // Вестник Волгоградского гос. ун-та. Серия 9, Исследования молодых учёных. - 2010. - Вып. 8, ч. 2. - С. 118-123.
8. Жога, В.В. Программные движения робота с ортогональным шагающим движителем / В.В. Жога, А.Е. Гаврилов // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 9. - С. 22-28.

УДК 681.5

А. Р. Зайцев

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУХОГО ФРИКЦИОННОГО ДВОЙНОГО СЦЕПЛЕНИЯ



Александр Русланович Зайцев, специалист
LuK GmbH & Co. KG
Германия, Бюль
Тел.: (+49)173-365-2246, E-mail: alzarus@gmail.com

Аннотация

В работе рассматривается процесс переключения передач в автомобильной трансмиссии, оснащённой сухим фрикционным двойным сцеплением. Вводится понятие коэффициента перекрытия и показывается его влияние на эффективность автоматического управления во время соревновательного процесса переключения передач. Приводятся зависимости для определения работы буксования сцепления — основного комплексного критерия оценки нагруженности пар трения фрикционных дисков. Формулируется методика выбора оптимального значения коэффициента перекрытия.

Ключевые слова: сухое фрикционное двойне сцепление, преселективная коробка переключения передач, система автоматического управления, момент трения сцепления, работа буксования сцепления.

A. R. Zaytsev

OPTIMIZATION OF THE TUNING ALGORITHMS FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE DRY FRICTIONAL DUAL CLUTCH

Alexander R. Zaytsev, LuK GmbH & Co. KG, Germany, Buehl,
e-mail: alzarus@gmail.com

Abstract

During the gear switching in the automatic automobile transmission with a dry frictional dual clutch the overlapping time factor on the one hand may reduce the switching time, but from the other hand it may also lead to the intense clutch slipping and as a result to the increased wear of the friction discs. The present article focuses on a calculation methodology developed to optimize tuning algorithms for automatic control system of the dual clutch transmission for the different operating conditions of the car.

Key words: dry dual friction clutch, dual-clutch transmission, automatic control system, clutch torque, work of clutch slipping.

Объект и задача исследования

Преселективная коробка переключения передач (КПП), оснащённая механизмом сухого фрикционного двойного сцепления (СФДС), состоит из двух независимых кинематических цепей, замыкающих оба ведущих вала сцеплений на механизм дифференциала автомобиля. Одно сцепление устанавливается в кинематической цепи чётных ступеней передач, а второе — в нечётных ступенях в ряде передаточных отношений. Процессы размыкания цепи текущей передачи и замыкания следующей совмещены во времени. На рис. 1 приведена типовая принципиальная кинематическая схема преселективной КПП.

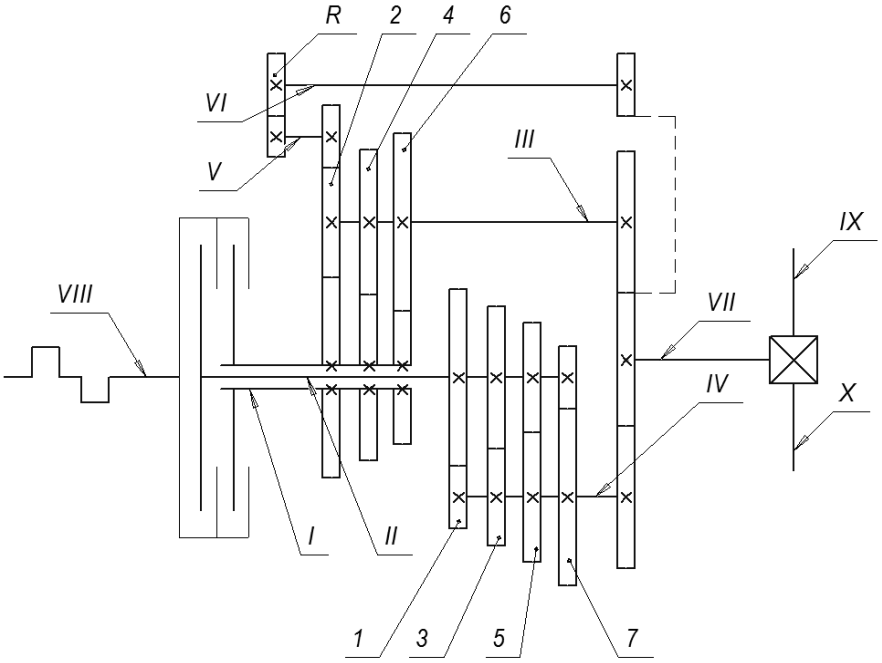


Рис. 1. Принципиальная кинематическая схема преселективной КПП

Через первое сцепление и ведущий вал II включаются первая, третья, пятая и седьмая передачи. Вторая, четвёртая, шестая и задняя передачи включаются при закрытии второго сцепления через ведущий полый вал I. В соответствии с включённой передачей оба ведущих вала передают вращательный момент от двигателя к ведомым валам III и IV соответственно. При включении задней передачи момент передаётся к дифференциалу по ведомым валам V и VI. Все три выходных вала КПП соединены с зубчатым колесом главной передачи дифференциала.

Законы управления моментами трения СФДС формируются на основе сигналов, поступающих от датчиков частоты вращения ведущего вала двигателя и ведущих валов трансмиссии, датчиков числа оборотов колёс

автомобиля, положения педали газа, а также положения переключателя в селекторе передач (рис. 2).

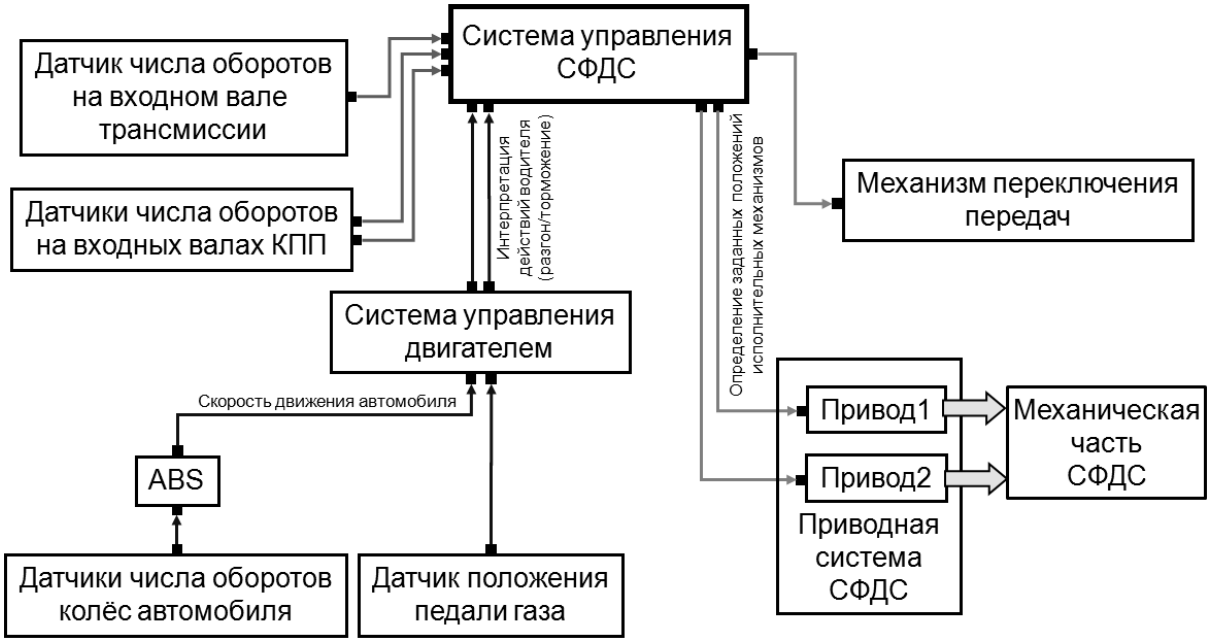


Рис. 2. Структурная схема системы управления ПКПП

Система автоматического управления (САУ), сравнивая частоты вращения ведущих и ведомых валов трансмиссии, определяет соответствующие разности частот вращения элементов сцепления. По значениям датчиков числа оборотов колёс определяется скорость движения автомобиля. Положение педали газа сообщает о намерениях водителя (разгон/торможение) [1].

В том случае, если на основании полученных данных САУ принимает решение о необходимости переключения передачи, то она посылает сигнал в приводной механизм СФДС, который открывает одно сцепление и одновременно с этим закрывает другое.

Эффективно сформулированные законы управления СФДС позволяют снижать динамические нагрузки в трансмиссии, а также положительно влияют на топливно-экономические, тягово-скоростные и экологические характеристики всего автомобиля.

В открытой печати представлено большое количество работ, посвящённых оптимизации законов управления однодисковыми сцеплениями для всех возможных режимов движения. Особое внимание уделяется автоматическому управлению в переходных режимах [2-5, 10, 11]. Однако в случае с двойным сцеплением у САУ появляется дополнительная степень свободы: возможность различного совмещения во времени двух переходных режимов первого и второго сцеплений. Работы, посвящённые автоматическому управлению двойными сцеплениями, в

настоящее время в открытой печати отсутствуют.

Эффективность автоматического управления СФДС во время соревновательного процесса переключения передач во многом определяется степенью синхронизации приводных механизмов, выражаемой в виде коэффициента перекрытия $K_П$. Данный коэффициент отражает степень одновременности движений выжимных подшипников приводного механизма в процессе открытия одного сцепления и закрытия другого.

В случае, когда коэффициент перекрытия равен нулю, сначала происходит полное открытие одного сцепления, и лишь затем начинается процесс закрытия второго. При перекрытии $K_П = 0.5$ приводные механизмы обоих сцеплений начинают и заканчивают своё движение одновременно. Т.е. начало процесса открытия одного сцепления совпадает по времени с началом процесса закрытия другого сцепления.

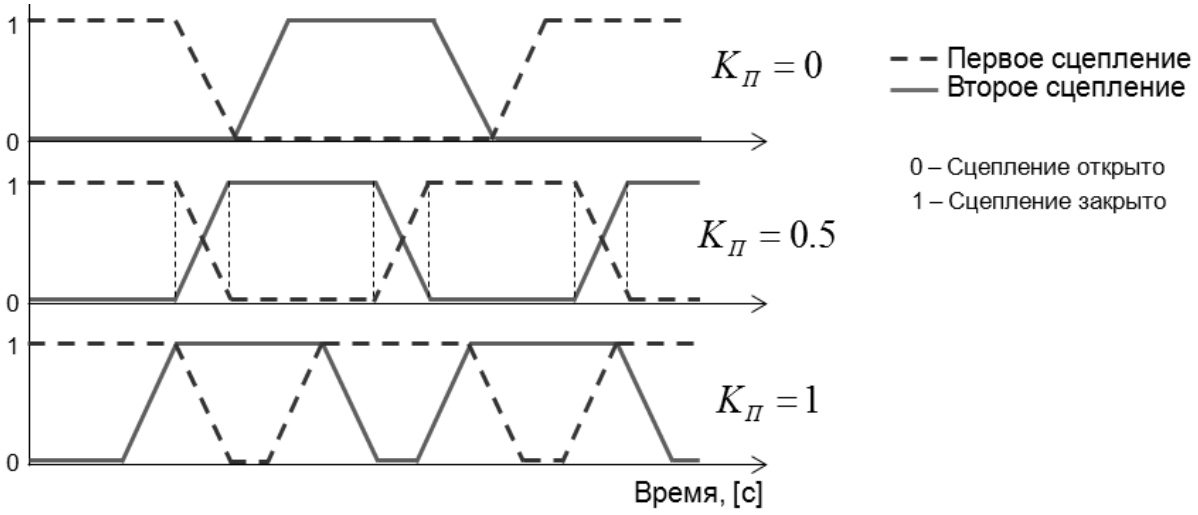


Рис. 3. Схема переключений сцеплений при различных значениях коэффициента перекрытия

Как видно из рис. 3, чем выше значение коэффициента перекрытия, тем меньше прерывание передаваемого момента и потери на холостую работу двигателя. Однако при слишком высоком перекрытии из-за интенсивного проскальзывания и обильного тепловыделения в зонах трения резко увеличивается износ фрикционных дисков и, как следствие, сокращается срок службы всего механизма СФДС.

Отсюда возникает задача нахождения оптимального значения коэффициента перекрытия для заданного эксплуатационного режима работы автомобильной трансмиссии. В качестве основного критерия оптимизации в поставленной задаче выступает максимально возможное сокращение времени переключения передач при разгоне автомобиля. При этом ограничение на быстродействие СФДС накладывают требования по предельно допустимой интенсивности износа фрикционных дисков.

Методика определения оптимального значения коэффициента перекрытия

В работах, посвящённых исследованиям долговечности фрикционных накладок автомобильных сцеплений, в качестве критерия уровня нагруженности пар трения выступает работа буксования сцепления $A_б$, определяющаяся следующим образом [4, 5, 6]:

$$A_б = \int_0^{t_б} M_C\left(\omega_Д - \omega_В\right)dt, \qquad (1)$$

где M_C — момент сил трения сцепления; $t_б$ — время буксования (период от начала соприкосновения поверхностей трения до момента полной синхронизации ведущего и ведомого дисков); $\omega_Д$ — угловая скорость ведущих элементов сцепления (коленчатого вала); $\omega_В$ — угловая скорость ведомых элементов сцепления.

Долговечность фрикционных накладок, оцениваемая с помощью работы буксования обоих сцеплений, может быть использована в качестве критерия оптимизации при нахождении оптимального значения коэффициента перекрытия $K_П$ для заданного режима движения.

С помощью математических моделей статики и динамики СФДС, представленных в работах [12, 13], по заданной геометрии и упруго-диссипативным характеристикам исследуемого сцепления можно однозначно определить величины моментов трения обоих сцеплений M_{C1} и M_{C2} в зависимости от положений выжимных подшипников и внешних сил возмущений. Пример подобной расчётной зависимости представлен на рис. 4.

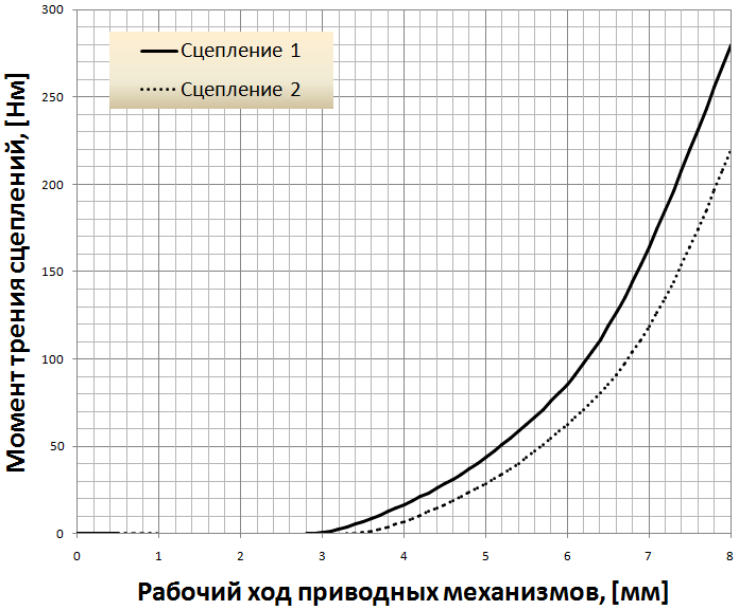


Рис. 4. Зависимость моментов трения первого и второго сцеплений от положений выжимных подшипников

Зададимся нагрузочной характеристикой, связывающей значения эффективного крутящего момента с величиной угловой скорости ведущего вала двигателя. В качестве примера рассмотрим автомобиль Škoda Rapid 1,2 TSI, на который устанавливается роботизированная семиступенчатая преселективная КПП DSG-7, оснащённая двойным сцеплением производства компании Volkswagen [7].

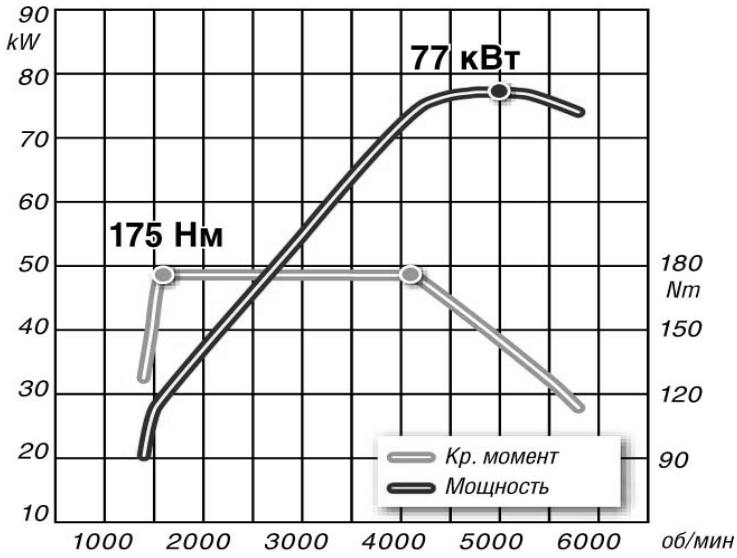


Рис. 5. Внешняя нагрузочная характеристика двигателя 1,2 TSI

На рис. 6 представлены результаты динамических симуляций процесса переключения из первой во вторую передачу при разгоне автомобиля с полностью открытой дроссельной заслонкой для различных значений коэффициента перекрытия: 0.2, 0.5 и 0.8. Принцип построения математической моделей динамики автомобильной трансмиссии, использованной для представленных расчётов, подробно рассматривается в работах [10, 11].

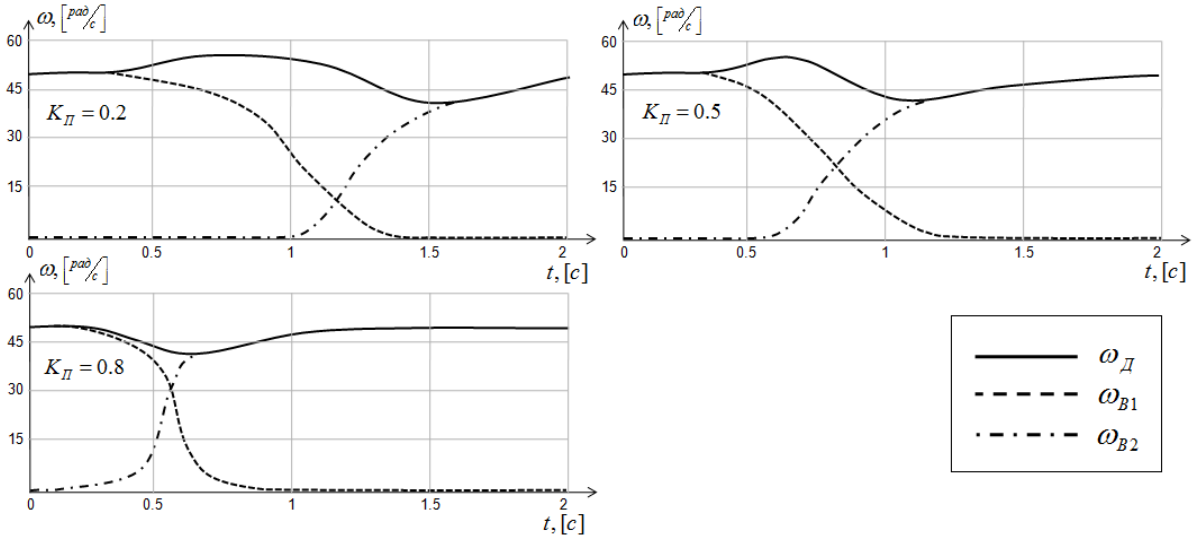


Рис. 6. Результаты симуляции процесса переключения передач СФДС

Здесь ω_{B1}, ω_{B2} — угловые скорости первого и второго ведомых валов сцепления соответственно.

Как видно из рис. 6, чем выше значение коэффициента $K_П$, тем быстрее протекает процесс переключения передач. Однако это приводит к увеличению тепловыделения в зоне трения и, как следствие, повышенному износу фрикционных накладок. Для оценки интенсивности степени изнашивания обоих фрикционных дисков СФДС рассмотрим суммарную работу буксования:

$$A_б = A_{б1} + A_{б2} = \sum_{i=1}^{2} \int_0^{t_{бi}} M_{Ci}(\omega_Д - \omega_{Bi})dt, \quad (2)$$

где $A_{б1}$, $A_{б2}$ — работы буксования первого и второго сцеплений соответственно.

Результаты расчётов суммарной работы буксования для различных значений коэффициента перекрытия представлены на рис. 7.

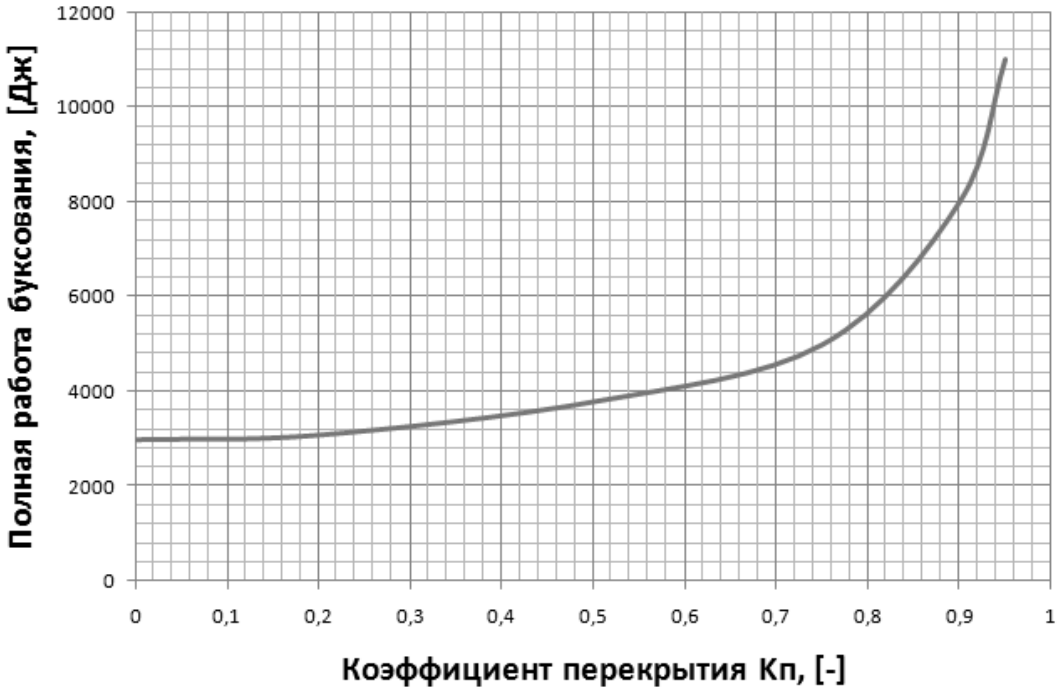


Рис. 7. Суммарная работа буксования СФДС в зависимости от коэффициента перекрытия

Согласно экспериментальным исследованиям [8, 9] значение работы буксования можно соотнести с мерой долговечности фрикционных накладок, выраженной числом циклов включения сцепления до достижения предельно допустимого износа. Результаты экспериментальных данных, указанных исследований представлены на рисунке 8 [11].

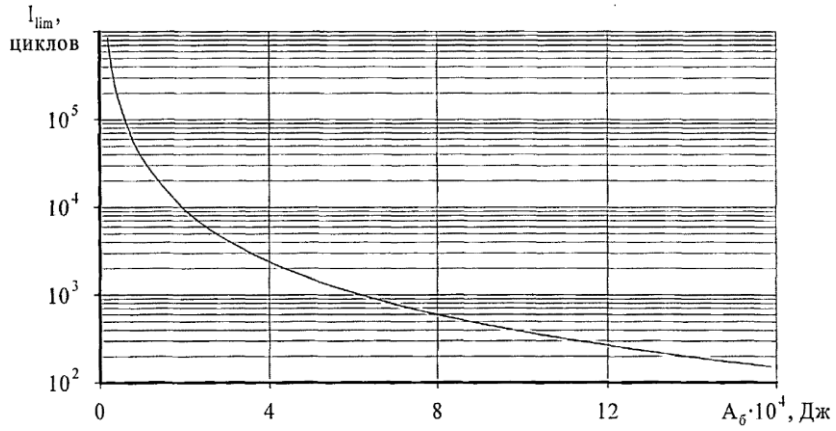


Рис. 8. Зависимость количества циклов включения сцепления до достижения предельно допустимого износа фрикционных накладок

Сопоставляя графики, представленные на рисунках 7 и 8 можно вывести зависимость количества циклов включения СФДС до достижения предельно допустимого износа относительно коэффициента перекрытия. На основании этой зависимости и расчётной нагрузочной характеристики СФДС [12, 13] могут быть сформированы законы управления положениями выжимных подшипников в процессе переключения передач.

Выводы

Представленная методика, базируясь на нагрузочной характеристике двигателя и зависимости моментов трения первого и второго сцеплений от положений выжимных подшипников, позволяет заранее определять степень интенсивности износа фрикционных дисков для произвольного значения коэффициента перекрытия $K_П$.

Условия эксплуатации автомобильной трансмиссии обладают явно выраженными стохастическими свойствами. Оптимальные алгоритмы настройки САУ определяются стилем вождения отдельно взятого водителя, состоянием дорожного покрытия, погодными условиями, полной массой автомобиля, а также ландшафтом местности.

При выборе оптимального значения коэффициента перекрытия для конкретного эксплуатационного режима работы автомобильной трансмиссии необходимо приходить к компромиссу между топливно-экономическими и тягово-скоростными характеристиками автомобиля с одной стороны и ресурсоёмкостью механизма СФДС с другой. Случайный характер возникновения конкретной эксплуатационной ситуации определяется множеством возможных значений различных параметров.

Опираясь на результаты, полученные с помощью представленной расчётной методики, возможно осуществление точной настройки параметров САУ для конкретного режима движения автомобиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Service Training: Selbststudienprogramm 390 «Das 7-Gang-Doppelkupplungsgetriebe 0AM: Konstruktion und Funktion» // Technischer Stand 12.2007.
2. Ю.М. Захарик. Системы управления сцеплением. Тенденции развития // Автомобильная промышленность. 2003. – №1 С. 13-15.
3. Н.Н. Ткаченко Автоматическая коробка передач // Серия «Техномир». – Ростов н/Д: Феникс, 2001. 160 с.
4. Л.А. Гивартовский Исследование режимов работы сцепления автомобиля: Дис. канд. техн. наук // Московский автомеханический институт. – М., 1965. – 147 с.
5. А.В. Кретов Выбор параметров и законов регулирования автоматического сцепления по критериям минимизации нагрузочных режимов трансмиссии: Дис. канд. техн. наук // Московский автомеханический институт. – М., 1987. – 214 с.
6. П.П. Лукин Конструирование и расчёт автомобиля: Учебное пособие // – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.
7. Д. Чабан Тест-драйв Škoda Rapid 1,2 TSI: Генетический код // Автоцентр №32 2012.
8. А.И. Коряева Прогнозирование долговечности пар трения сцеплений большегрузных автомобилей по результатам стендовых испытаний: Дис. канд. техн. наук // Московский автомеханический институт. – М., 1974. – 159 с.
9. Г.М. Щеренков Пары трения автомобильных сцеплений (теория, испытания и расчёт): Дис. докт. техн. наук // ВНИИАТИ - Ярославль, 1976. – 370 с.
10. И.П. Емельянов Исследование динамики управляемого электромеханического привода сцепления автомобиля: Дис. канд. техн. наук // Курский государственный технический университет. – Курск, 2007. – 121 с.
11. А.Е. Есаков Методика создания алгоритмов для систем управления фрикционными сцеплениями автомобильных автоматических трансмиссий: Дис. канд. техн. наук // Московский государственный технический университет. – М., 2010. – 161 с.
12. А.Р. Зайцев Исследование статического равновесия сухого фрикционного двойного сцепления // Механизация строительства. – 2013. – № 1. – с. 14-19.
13. А.Р.Зайцев. Исследование осевой динамики механизма сухого фрикционного двойного сцепления // Теория механизмов и машин. 2013. Т.11. №1. С. 32-42.

УДК 622.23.05

К.А. Зиборов, Г.К. Ванжа, В.Н. Марьенко

ДИСБАЛАНС КАК ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИЙ НА РАБОТУ РОТОРОВ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ



Кирилл Альбертович Зиборов, к.т.н., доцент
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» Украина, Днепропетровск
Тел.: +38(0562) 46-90-06; E-mail: ziborov@nmu.org.ua



Геннадий Куприянович Ванжа, к.т.н., доцент
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» Украина, Днепропетровск
Тел.: +38(0562) 46-90-06



Владислав Николаевич Марьенко, аспирант
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» Украина, Днепропетровск
Тел.: +38(098) 117-58-32; E-mail: vados.v-ma@ya.ru

Аннотация

В работе рассмотрены причины возникновения дисбаланса вращающих масс в шахтных вентиляторах главного проветривания, а также пути их устранения. В результате анализа определены факторы, влияющие на работоспособность шахтных вентиляторов, предложены пути устранения. Рассмотрена конструкция регулируемой подшипниковой опоры.

Ключевые слова: дисбаланс, вентилятор, опора

K.A. Ziborov, G.K. Vanga, V.N. Marenko

IMBALANCE AS A MAJOR FACTOR INFLUENCING THE WORK ROTORS MINE MAIN FAN

Dr. Kiril A. Ziborov[1], e-mail: ziborov@nmu.org.ua;
Dr. Genadiy K. Vanga[1], tel. Тел.: +38(0562) 46-90-06;
Vladislav N. Marenko[1], e-mail: vados.v-ma@ya.ru.
[1]National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Abstract

The paper discusses causes of imbalance of rotating mass in shaft of main fans and ways to address them. An analysis of the major factors which affecting the efficiency of mining fans is given. The ways of eliminating these factors.

Key words: imbalance, fan, reliance

Введение. В горной промышленности широкое применение находят роторные машины (осевые вентиляторы, центробежные насосы, роторы электрических машин, турбомашин и многоступенчатые центробежные насосы и т. п.), основным узлом которых являются длинномерные валы, опирающиеся своими концами на соосно-расположенные подшипниковые опоры.

На режим работы роторных машин существенное влияние оказывают специфические условия, к которым можно отнести: непостоянство рабочего места; разнообразие физико-механических свойств разрушаемых пород; влажность окружающей среды и химическая активность шахтных вод; взрывоопасность шахтной атмосферы и др.

Все перечисленные факторы относятся, в том числе, и к шахтным вентиляторам главного проветривания, которые испытывают значительные динамические нагрузки в 1,5 – 2 раза превышающие средние значения [1], и вызывают усталостный износ, а также приводят к быстрому разрушению элементов опорных узлов.

На сегодняшний день исследования в этой области находятся на стадии рекомендаций, разработки методик диагностирования и устранения неисправностей, а также усиления методов контроля надежности шахтных вентиляторов главного проветривания [10-14].

Постановка задачи: проанализировать основные причины возникновения дисбаланса в процессе работы шахтных вентиляторов главного проветривания, предложить технические решения по устранению влияния установленных негативных факторов.

Материалы исследования: на основе проведенного анализа литературных источников [2-5], основными причинами выхода из строя элементов роторных машин является вибрация, возникающая из-за появления дисбаланса вращающихся масс. По типу и специфике проявления вибрации, а также по особенностям проведения диагностики, дисбаланс можно условно разделить на такие виды: статический; динамический; технологический и тепловой [2-6].

В настоящее время разработано множество разнообразных методик устранения статического и динамического дисбаланса вращающихся масс [2-6]. Их различие в основном определяется выбором критерия, по которому оцениваются результаты балансировки:

- минимизация остаточных уровней вибрации;
- минимизация средних остаточных уровней вибрации;
- минимизация наибольшего из уровней вибрации по точкам контроля и т.д.

Отдельные детали, из которых собирается роторная машина в большинстве своем являются сбалансированными. Но, при взаимной работе возникает необходимость учитывать их геометрию и массу, как отдельных звеньев сложной механической системы. Поэтому систему роторного вала

применительно к шахтным вентиляторам главного проветривания надо рассматривать как совокупность звеньев, принимаемых участие во вращательном движении.

В шахтных вентиляторах главного проветривания конструктивно предусматривают применения длинномерных валов (4-6м). Это обуславливает особую технологию их изготовления. Обработка производится на токарных станках в центрах с последующей переустановкой, что само по себе увеличивает погрешность базирования. При этом необходимо учитывать жесткость вала на протяжении всей длины, так как в среднем сечении вала жесткость достигает минимальных значении. Кроме того, в процессе изготовления жесткость системы станок-приспособление-инструмент (СПИ) отражается на качестве поверхности валов и геометрии сечения. При нежесткой системе возможно получение эллиптического сечения вала, что влечет за собой появления дисбаланса вращающихся масс.

Поэтому, для сохранения жесткости системы роторного вала используют большое количество подшипниковых опор (3 и более), но в шахтных вентиляторах главного проветривания вал ротора опирается на две опоры, так как применение трех и более опорных узлов конструктивно не всегда возможно или экономически нецелесообразно.

В большинстве случаев промежуточный вал вентилятора не имеет своей опоры и соединяется в конструктивное целое с валами электродвигателя и ротора посредствам муфт, при этом должна обеспечиваться соосность их расположения. Т.е. динамическая ось вращения должна совпадать с геометрической, при этом необходимо, чтобы ось вращения была параллельна двум плоскостям проекции. Зубчатые муфты, применяемые для соединения валов между собой, в шахтных вентиляторах главного проветривания, являются довольно нагруженной частью конструкции, и не могут выполнять свои функции в процессе работы, что приводит к частым отказам.

Как отмечено в работах Ковалевской В.И., Бабака Г.А., Пака В.В., Демочко С.И., Кузнецова А.В., Паршинцева В.П., наиболее часто встречающимися неисправностями муфт является: перекос обоймы по отношению к каждой втулки; неудовлетворительная центровка; недопустимое радиальное и торцевое биение каждой полумуфты; перегрев муфт при не правильной посадке втулки муфты на валу; невыполнение заданной технологии изготовления, которая влечет за собой недостаточную твердость поверхности зубьев. По статистическим данным, приведенным в работе Грядущей В.В., количество отказов по причине выхода муфт из строя, составляет 15% [13].

В процессе ввода агрегата в эксплуатацию особое внимание уделяют центровке вала агрегата с валом электродвигателя. Для надежной работы установки необходимо, чтобы ось одного вала являлась продолжением другого. Поскольку достичь это не всегда предоставляется возможным, то

допускается некоторая несоосность, величина которой зависит от частоты вращения, конструкции соединяемых муфт и типа подшипников (табл. 1).

Таблица 1. Допустимые величины перекоса и параллельного смещения осей валов при посадочном диаметре муфты 500 мм (СНиП III-Г. 10.3-69)

Скорость вращения вала, об/мин	Величина смещения и перекоса, мм, для муфт		
	Жестких	Упругих пальцевых	Зубчатых
>3000	0,02	0,04	0,08
≤3000	0,04	0,06	0,10
1500	0,06	0,08	0,12
750	0,08	0,10	0,15
500	0,1	0,15	0,20

По данным фирмы Fixtur-Lazer AB (Швеция) в 49% случаях несоосность является причиной преждевременного износа машинного оборудования. Данные лаборатории вибродиагностики Октябрьского филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета (Россия), подтверждают, что величина расцентровки валов насосных агрегатов, превышающая 0,1 мм, составляет около 90% из всех обследованных агрегатов [6]. Таким образом, решение проблемы несоосносного расположения валов агрегата и электродвигателя является одной из наиболее актуальных среди существующих неисправностей.

Фирма Witt&Sohn утверждает, что проводимая на заводе-изготовителе юстировка обоих валов по соосности, на месте установки вентилятора может быть нарушена. Хотя муфта и компенсирует относительно большие погрешности, при этом все же возникают силы, действующие на валы и подшипники, которые приводят к значительному повышению колебаний, особенно при большой мощности и частоте вращения. Частота этих колебаний соответствует 2-й гармонике частоты вращения и таким образом может быть хорошо отличимая от дисбаланса [6].

Опоры вентиляторов при транспортировке или установке могут деформироваться, например, из-за неровностей пола. Поэтому соосность как опор, так и валов следует проверять и при необходимости юстировать в условиях производства [7].

Обычно срок службы шахтных вентиляторов главного проветривания определяется сроком эксплуатации подшипникового узла (хотя расчетная долговечность подшипникового узла превышает 10-15 лет, он является одним из наименее надежных элементов), от надежности которого во многом зависит безаварийная работа всего вентилятора. На долю подшипниковых узлов приходится свыше 50% всех аварийных ситуаций [9-13].

Вибрация, которая приводит к разрушению подшипников, а в целом, и выхода из строя самих подшипниковых опор в большинстве своем проис-

ходит из-за возникновения *местного дисбаланса*. Это вызвано из-за вовлеченной во вращательное движение неплотно смонтированной внутренней обоймы подшипника, что приводит к её «волочению» за вращаемым валом.

Попытки решить задачу самоустановки вала с помощью выбора определенного типа подшипников имеют ограничения в применении из-за сложностей их монтажа и высоких требований при изготовлении посадочных поверхностей.

Как правило, в обеих подшипниковых опорах ротора устанавливаются одинаковые роликоподшипники. Подшипник, который предназначен для восприятия помимо радиальной также и осевой нагрузки, фиксируется по наружной обойме врезными кольцами или торцевыми крышками. Радиально-упорные подшипники расположены обычно на конце вала, противоположном приводной муфте, с тем, чтобы разгрузить вал на участке, передающем крутящий момент, от сжатия или растяжения осевым усилием.

В том случае, когда в опорах вентиляторов применяются роликоподшипники с цилиндрическими роликами, они устанавливаются в сферических стаканах. При этом корпус подшипника выполняется со сферической расточкой либо снабжается регулируемыми подушками с внутренней сферической поверхностью [9-12].

Сложная форма (сферическая) поверхностей стаканов, корпусов и подушек приводит к тому, что наружные обоймы подшипников практически не устанавливаются соосно с валом. Кроме того, наличие нескольких концентричных деталей, разделенных на всей цилиндрической поверхности воздушным зазором, резко ухудшает отвод тепла от роликоподшипника, а следовательно, и условие его работы.

Дополнительным фактором возникновения неуравновешенности является то, что подшипниковые опоры шахтных вентиляторов главного проветривания не имеют общей рамы, и устанавливаются на отдельных плитах непосредственно на бетон фундамента с последующей подливкой плит. При этом горизонтальность вала и соосность опор достигается только за счет выставки плит и корпусов при монтаже. Кроме того, межопорные расстояния в этих машинах таковы, что прогиб вала составляет 10-15 мм, а уклон шеек у подшипников – 2 – 2,5 мм/м [8].

Таким образом, можно отметить, что применение зубчатых муфт не дает возможность эффективно компенсировать существующие величины прогиба вала и уклонов шеек, а установка дополнительных подшипниковых опор конструктивно не всегда возможна, или экономически нецелесообразна. К тому же опоры валов для обеспечения работы предусматривают наличие зазоров в подшипниках, что в свою очередь вызывает несоосность, и сказывается на амплитуде колебаний при вращении одного из торцов вала и системы в целом.

С целью уменьшения амплитуды колебаний при вращении вала, а

также для получения возможности более точной регулировки соосного расположения опор и как следствие снижение динамических составляющих рабочей нагрузки предлагается использование регулируемой подшипниковой опоры [14].

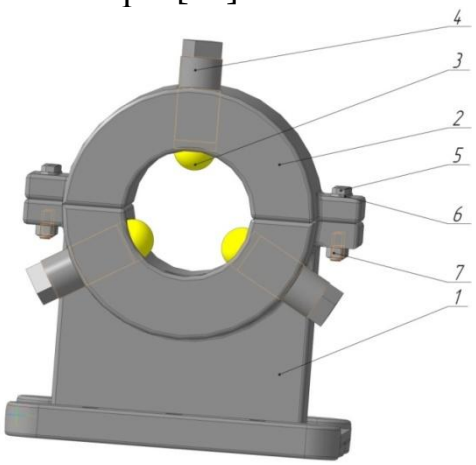


Рис. 1. Подшипниковая опора.

Предлагаемая авторами подшипниковая опора (рис. 1) включает в себя корпус 1, на котором смонтирована крышка 2, внутри которых расположен вал ротора, где в месте контакта со сферами 3 выполнена канавка трапецеидальной формы. По периметру под равными углами расположены технические отверстия с резьбой, каждое из которых оснащено упорным винтом 4 с контактной конической поверхностью в торце. В месте между упорным винтом 4 и валом ротора расположены самоустанавливающиеся сферические элементы (шары) 3, которые имеют возможность радиально перемещать вал при помощи осевой подачи винтов 4. Разъемная конструкция подшипниковой опоры позволяет выполнять регулировку соосности опор валов практически любой длины, а наличие канавки в месте соприкосновения шаров 3 с валом, дает возможность противодействовать осевому перемещению в обоих направлениях.

Выводы. Выполненный анализ причин возникновения дисбаланса в процессе монтажа и работы шахтных вентиляторов главного проветривания показал, что для повышения срока службы роторных машин, а также минимизации вибрации и устранения дисбаланса установки, необходимо:

1) выполнять юстировку обоих валов по соосности не только на заводе-изготовителе, а и непосредственно перед вводом в эксплуатацию, периодически повторять её в процессе работы;
2) выполнять регулировку соосного расположения опорных элементов вала с помощью регулируемой опоры, что позволит упростить обслуживание шахтного вентилятора главного проветривания в процессе эксплуатации;
3) обосновать параметры регулируемой подшипниковой опоры (при диаметре вала ротора 200-600 мм), что позволит более эффективно выполнять регулировку соосности опорных узлов агрегата и сопрягаемых валов ротора;
4) применение регулируемой подшипниковой опоры, которая в процессе эксплуатации позволит снизить требования к выбору типа соединяемых муфт, а также увеличить их долговечность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы: Учеб. пособие.— Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. – 196 с. илл. 86, табл. 7
2. Шилов П. М., - 2-е изд. перераб. и доп.: Технология производства и ремонт горных машин, – К.: Высшая школа, 1986. – 294-314.
3. Максименко А.И.— Сб. «Колебания и уравновешивание роторов». Изд-во «Наука», 1973.
4. Гусаров А.А., Деглин Э.Г.— Сб. «Колебания и уравновешивание роторов». Изд-во «Наука», 1973.
5. Банах Л.Я., Перминов М.Д., Шаталов Л.Н.— Сб. «Колебания и уравновешивание роторов». Изд-во «Наука», 1973.
6. Яценко В.А. Дисбаланс как одна из причин вибрации роторов шахтных стационарных машин // «Гірничо-електромеханіка»: Сб. научн. тр. Донецкого національного технического университета. – Вып.17(157) – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2009. – 284-291с.
7. Филимонов О.В. Разработка методов и технических средств контроля соосности валов по результатам вибродиагностики насосных агрегатов. // Автореферат. Уфа 2002.стр.3.
8. Акционерное общество Witt&Sohn. Руководство по эксплуатации
9. Ковалевская В.И., Бабак Г.А., Пак В.В. Шахтные центробежные вентиляторы. – М.: Недра, 1976. – 191с.
10. Демочко С.И., Кузнецов А.В., Паршинцев В.П. Неисправности шахтных вентиляторных установок главного проветривания: Справочное пособие. – М.: Недра, 1990. – 188с.
11. Определение фактических показателей надежности вентиляторов ВОД-30М и ВОД-50: отчет о НИР/ВНИИГМ им. М.М. Федорова. – Инв. №1240 эр. – Донецк, 1986. – 45с.
12. Шахтные вентиляторы главного проветривания типа ВЦД-32, ВРЦД-4,5, ВОД-21 и ВЦ-25 (оценка эксплуатационной надежности): отчет о НИР/Донгипроуглемаш. – Инв. №А/4303. – Донецк, 1976. – 153с.
13. Грядущая В.В. Оценка эксплуатационной надежности шахтных вентиляторов главного проветривания: Диссертация канд. тихн. наук / Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет». – Донецк, 2010. – 34с.
14. Пат. 64617 Украина, МПК Е 21 С 50/00. Підшипникова опора: Пат. 64617 Україна МПК Е 21 С 50/00 К.А. Зіборов, Г.К. Ванжа, В.М. Мар'єнко (Україна); ДВНЗ «НГУ», – № u 2011 05154; Заявл. 22.04.2011, Бюл. №21. – 2 с.

УДК 621.01

К.С. Иванов

ЗУБЧАТЫЙ ВАРИАТОР В ВИДЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ И С ОДНИМ ВХОДОМ



Константин Самсонович Иванов, доктор технических наук,
Алматинский университет энергетики и связи,
Казахстан, Алматы, e-mail: ivanovgreek@mail.ru

Аннотация

Кинематическая цепь с двумя степенями свободы и одним входом, содержащая замкнутый контур, является механизмом. Работа посвящена раскрытию геометрической связи параметров кинематической цепи с замкнутым контуром и изложению сущности парадокса теории механизмов в геометрической и аналитической форме.

Ключевые слова: две степени свободы, замкнутый контур, определимость.

K.S. Ivanov, Dr.Sci.Tech., Almaty University of Power Engineering and Telecommunication, Kazakhstan, Almaty, e-mail: ivanovgreek@mail.ru.

Abstract

Kinematic chain with two degree of freedom and one entry containing closed contour is the mechanism. Work is devoted to disclosing of a geometric constraint of the kinematic chain with closed contour parameters and to describing of mechanisms theory paradox essence in geometrical and analytic form.

Keywords: two degree of freedom, closed contour, definability.

Введение

Парадокс теории механизмов и машин связан с появлением информации об использовании кинематической цепи с двумя степенями свободы и одним входом для достижения саморегулирования или силовой адаптации. Согласно теории механизмов и машин [9] число степеней свободы механизма должно быть равно числу входных звеньев. Однако в последнее время появились патенты и публикации с описанием саморегулирующегося механизма в виде двух подвижной кинематической цепи с замкнутым контуром. Возможность

определимости двух подвижной кинематической цепи с одним входом составляет парадокс теории механизмов и машин.

Впервые возможность практического использования механизма с двумя степенями свободы и одним входом была представлена в патенте на без реактивный двигатель [2] в 1980 году.

В патентах Крокета С. [18] и Волкова И. [1] представлена идея создания бесступенчато регулируемой передачи с постоянным зацеплением зубчатых колес в виде гидродинамического преобразователя и зубчатого дифференциала с двумя степенями свободы. Механизм с двумя степенями свободы и одним входом в виде зубчатого дифференциала представлен в патенте Д. Харриса [10]. В патентах Иванова К.С. [3, 4, 5, 11] представлены различные варианты конструкций зубчатой адаптивной передачи в виде зубчатого дифференциала с двумя степенями свободы.

Впервые доказательство определимости движения двух подвижного механизма с одним входом было представлено Ивановым К.С. в 1995 году [12]. В последующих работах Иванов К.С. приводил доказательство определимости движения двух подвижного механизма на основе использования принципа возможных перемещений [13, 14, 15]. В работах [6 - 8] была теоретически обоснована дополнительная связь между звеньями двух подвижного механизма, если он имеет замкнутый контур. Дальнейшее развитие теория адаптивных механизмов получила в работах [16, 17].

Настоящая работа посвящена поиску геометрического образа дополнительной связи и доказательству существования дополнительной связи, вызывающей парадокс теории механизмов. Работа выполнена на основе закономерностей механики и теории механизмов и машин.

Исследование движения кинематической цепи с двумя степенями свободы с помощью картины скоростей

Исследуемая кинематическая цепь имеет вид зубчатого дифференциала с двумя степенями свободы (рис. 1). Дифференциал содержит стойку 0, водило H_1, сателлит 2, блок центральных колес 1-4, блок эпициклических (кольцевых) колес 3-6, сателлит 5 и водило H_2. Зубчатые колеса образуют четырехзвенный замкнутый контур 1-2-3-6-5-4. Размеры зубчатых колес 1, 2, 3, 4, 5, 6 определяются соответствующими радиусами $r_i \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Радиусы водил $r_{H1} = r_1 + r_2$, $r_{H2} = r_4 + r_5$.

Справа от механизма представлена картина скоростей $V_i \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ звеньев механизма. Линейные скорости V_i выражаются

через угловые скорости ω_i по формуле $V_i = \omega_i r_i$. Линейные скорости водил $V_{Hi} = \omega_{Hi} r_{Hi}$, $i = 1, 2$.

Начальная картина скоростей показана сплошными линиями. Промежуточная картина скоростей показана пунктирными линиями. Угловая скорость водила H_1 определяется линией Ab. Угловая скорость сателлита 2 представлена наклонной линией, проходящей через точку b, соответствующую точке B водила H_1. Угловая скорость сателлита 5 представлена наклонной линией, проходящей через точку k, соответствующую точке K водила H_2.

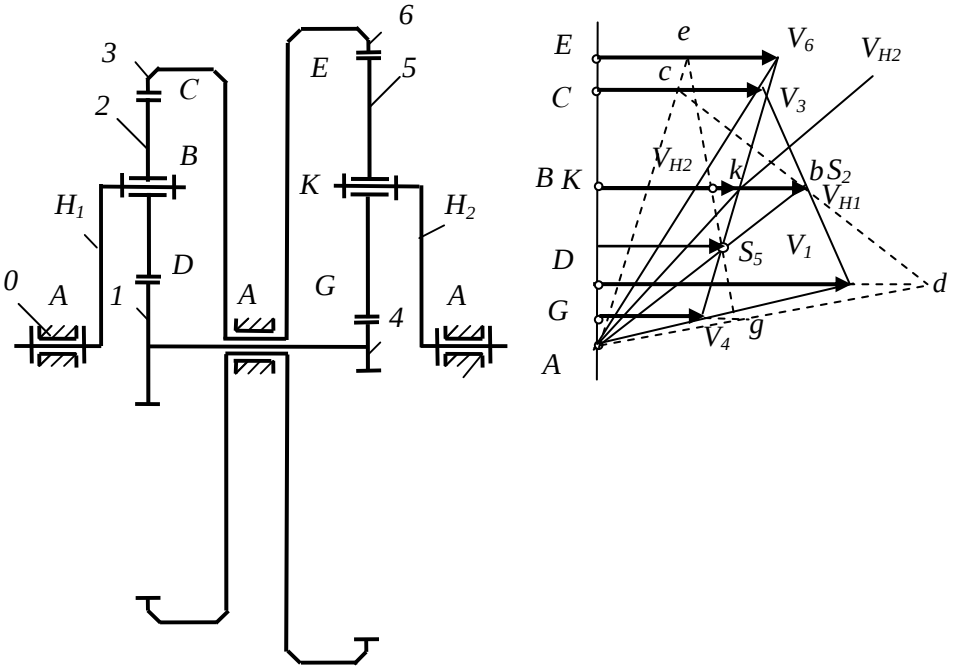


Рис. 1. Зубчатый дифференциальный механизм и картина его скоростей

Промежуточная картина скоростей механизма представлена пунктирными линиями. Точка S_5 пересечения линии eg угловой скорости сателлита 5 с линией Ab угловой скорости водила H_1 является мгновенным центром S_5 вращения сателлита 5 относительно водила H_1. Докажем, что мгновенный центр S_5 вращения сателлита 5 будет занимать неизменное положение на линии Ab угловой скорости водила H_1.

Теорема. В дифференциальном зубчатом механизме, содержащем два водила, два сателлита и два блока центральных колес, сателлит имеет постоянный мгновенный центр относительного поворота на противоположном водиле.

Для доказательства рассмотрим сначала картину скоростей кинематической цепи в обращенном движении при неподвижном водиле H_1 (рис. 2). При неподвижном водиле H_1 линейная скорость $V_{H1} = 0$. Мгновенный центр вращения S_2 сателлита 2 совпадает с точкой B. Проводим линию cS_2d угловых скоростей сателлита 2 . Проводим линию Ac угловых скоростей звена 3-6 и находим на ней точку e, определяющую скорость V_6 точки E механизма. Проводим линию Ad угловых скоростей звена 1-4 и находим на ней точку g, определяющую скорость V_4 точки G механизма. Проводим линию eg угловых скоростей сателлита 5. Точка пересечения S_5 линии eg с вертикальной линией нулевых скоростей является мгновенным центром вращения сателлита 5. Точка S_5 является одновременно мгновенным центром поворота сателлита 5 относительно неподвижного водила H_1. Положение точки S_5 (размер $y = BS_5$) может быть однозначно определено через геометрические параметры механизма.

Промежуточная картина скоростей механизма представлена пунктирными линиями. Точка S_5 пересечения линии eg угловой скорости сателлита 5 с линией Ab угловой скорости водила H_1 является мгновенным центром S_5 вращения сателлита 5 относительно водила H_1. Докажем, что мгновенный центр S_5 вращения сателлита 5 будет занимать неизменное положение на линии Ab угловой скорости водила H_1.

Теорема. В дифференциальном зубчатом механизме, содержащем два водила, два сателлита и два блока центральных колес, сателлит имеет постоянный мгновенный центр относительного поворота на противоположном водиле.

Для доказательства рассмотрим сначала картину скоростей кинематической цепи в обращенном движении при неподвижном водиле H_1 (рис. 2). При неподвижном водиле H_1 линейная скорость $V_{H1} = 0$. Мгновенный центр вращения S_2 сателлита 2 совпадает с точкой B. Проводим линию cS_2d угловых скоростей сателлита 2 . Проводим линию Ac угловых скоростей звена 3-6 и находим на ней точку e, определяющую скорость V_6 точки E механизма. Проводим линию Ad угловых скоростей звена 1-4 и находим на ней точку g, определяющую скорость V_4 точки G механизма. Проводим линию eg угловых скоростей сателлита 5. Точка пересечения S_5 линии eg с вертикальной линией нулевых скоростей является мгновенным центром вращения сателлита 5. Точка S_5 является одновременно мгновенным центром поворота сателлита 5 относительно неподвижного водила H_1. Положение точки S_5 (размер

$y = BS_5$) может быть однозначно определено через геометрические параметры механизма.

Определим положение точки S_5 , используя подобие треугольников.

Последовательность составления уравнений соответствует последовательности геометрических построений картины скоростей на рис. 2.

1) $\frac{Cc}{Ee} = \frac{r_3}{r_6}$, $\frac{Dd}{Gg} = \frac{r_1}{r_4}$. Так как $Cc = Dd$, то

$$\frac{Ee}{Gg} = \frac{r_1 r_6}{r_3 r_4}. \qquad (1)$$

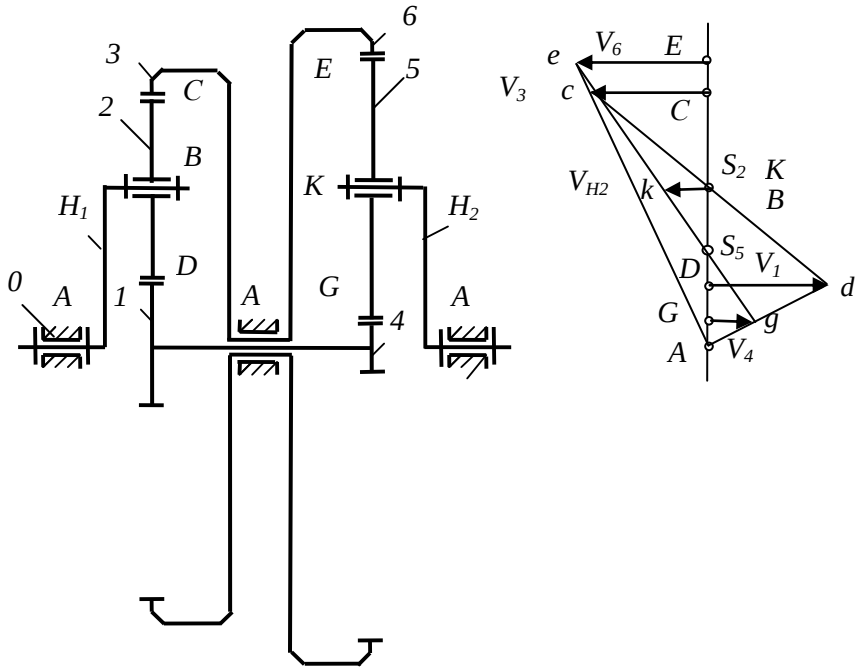


Рис. 2. Зубчатый дифференциальный механизм и картина скоростей механизма в обращенном движении при неподвижном входном водиле

2) $\frac{Kk}{Ee} = \frac{y}{r_5 + y}$, $\frac{Kk}{Gg} = \frac{y}{r_5 - y}$. Отсюда

$$\frac{Ee}{Gg} = \frac{r_5 + y}{r_5 - y}. \qquad (2)$$

Из (1) и (2) следует $\frac{r_1 r_6}{r_3 r_4} = \frac{r_5 + y}{r_5 - y}$. Отсюда

$$y = r_5 \frac{r_1 r_6 - r_3 r_4}{r_1 r_6 + r_3 r_4}. \qquad (3)$$

Формула (3) однозначно определяет положение мгновенного центра вращения S_5 сателлита 5 в обращенном движении относительно неподвижно-

го водила H_1. В действительном движении механизма точка S_5 будет двигаться вместе с водилом H_1, как это показано на картине скоростей движущегося механизма (рис. 1). Следовательно, сателлит 5 имеет постоянный мгновенный центр относительного поворота на противоположном водиле H_1, что и требовалось доказать.

Неизменное положение мгновенного центра относительного вращения S_5 на водиле H_1 определяет дополнительную геометрическую связь, которая имеет место в кинематической цепи с двумя степенями свободы. Однако эта дополнительная связь не имеет конструктивного выполнения. Конструктивно механизм остается кинематической цепью с двумя степенями свободы и сохраняет свои свойства.

Формула (3) выражает аналитически эту дополнительную геометрическую связь. В результате кинематическая цепь становится определимой при наличии только одного входного звена. Это означает, что при заданной угловой скорости входного водила можно однозначно определить скорости всех остальных звеньев и точек механизма.

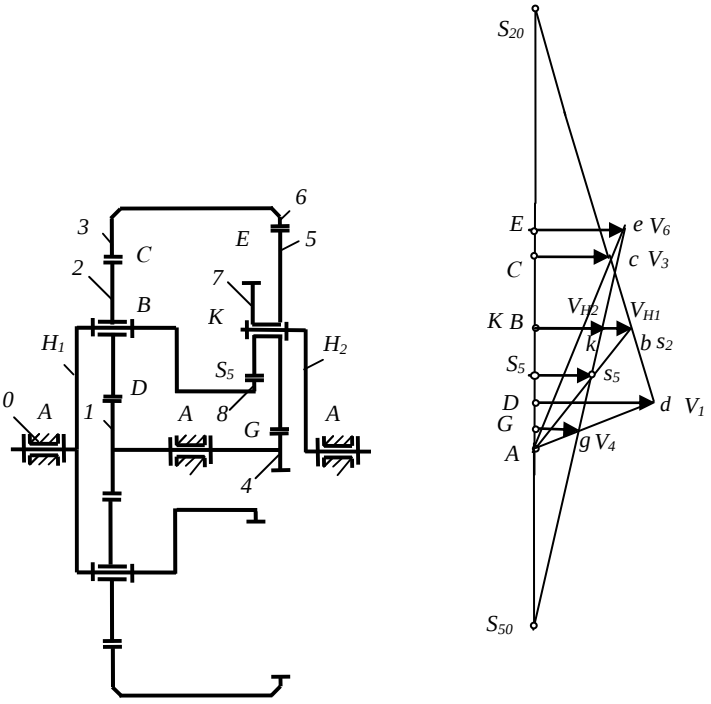


Рис. 3. Условный заменяющий механизм с одной степенью свободы и картина его скоростей

Найденная закономерность позволяет построить условный заменяющий механизм с одной степенью свободы (рис. 3). В заменяющем механизме вы-

ходной сателлит выполнен в виде блока колес 5-7 и присоединен высшей кинематической парой, совпадающей с мгновенным центром относительного вращения S_5, к зубчатому венцу 8 на входном водиле H_1. Условный механизм будет двигаться как одно целое без относительной подвижности колес в замкнутом контуре. Однако картина скоростей (рис. 1) допускает для заменяющего механизма относительное движение звеньев. Следовательно, конструктивная дополнительная связь в виде зацепления зубчатых колес 7, 8 условного заменяющего механизма является пассивной.

Силовой анализ кинематической цепи с двумя степенями свободы

Рассматриваемая кинематическая цепь с двумя степенями свободы содержит два звена, имеющих обобщенные координаты (водила H_1 и H_2) и присоединенный к ним замкнутый контур, содержащий зубчатые колеса 1-2-3-6-5-4 , имеющий нулевую подвижность.

Постановка задачи: Даны две обобщенные силы (моменты сил на водилах H_1 и H_2) M_{H1}, M_{H2}. Определить реакции в кинематических парах.

Решение. 1) Со стороны водил H_1 и H_2 на сателлиты 2 и 5 замкнутого контура передаются реакции

$$R_{H1} = M_{H1} / r_{H1}, \quad R_{H2} = M_{H2} / r_{H2}. \tag{4}$$

2) На сателлит 2 действует реакция R_{H1} в точке B и реакции $R_{12} = R_{32} = R_{H1} / 2 = M_{H1} / 2r_{H1}$ в точках D и C.

Условие равновесия сателлита 2 представим в виде равенства нулю моментов относительно мгновенного центра скоростей S_{20} (рис. 3).

$$R_{12} \cdot DS_{20} + R_{32} \cdot CS_{20} = R_{H1} \cdot BS_{20} \ . \tag{5}$$

3) Аналогично на сателлит 5 действует реакция R_{H2} в точке K и реакции $R_{45} = R_{65} = R_{H2} / 2 = M_{H2} / 2r_{H2}$ в точках G и E.

Условие равновесия сателлита 5 представим в виде равенства нулю моментов относительно неподвижного мгновенного центра скоростей S_{50}

$$R_{45} \cdot GS_{50} + R_{65} \cdot ES_{50} = R_{H2} \cdot KS_{50}. \tag{6}$$

4) Умножим уравнение (5) на ω_2. С учетом $\omega_2 \cdot DS_{20} = V_1, \quad \omega_2 \cdot CS_{20} = V_3, \quad \omega_2 \cdot BS_{20} = V_{H1}$ получим

$$R_{12} \cdot V_1 + R_{32} \cdot V_3 = R_{H1} \cdot V_{H1}. \tag{7}$$

Умножим уравнение (6) на ω_5. С учетом $\omega_5 \cdot GS_{50} = V_4, \quad \omega_5 \cdot ES_{50} = V_6, \quad \omega_5 \cdot KS_{50} = V_{H2}$ получим

$$R_{45} \cdot V_4 + R_{65} \cdot V_6 = R_{H2} \cdot V_{H2}. \tag{8}$$

Сложим уравнения (7) и (8)

$$R_{12} \cdot V_1 + R_{32} \cdot V_3 + R_{45} \cdot V_4 + R_{65} \cdot V_6 = R_{H1} \cdot V_{H1} + R_{H2} \cdot V_{H2}. \quad (9)$$

Уравнение (9) содержит силы, действующие на замкнутый контур из зубчатых колес 1-2-3-6-5-4, присоединенный к двум водилам (обобщенным координатам). Левая часть уравнения (9) представляет собой сумму мощностей (или работ) внутренних сил замкнутого контура. Правая часть уравнения (9) представляет собой сумму мощностей (или работ) внешних сил замкнутого контура. Будем считать кинематические пары замкнутого контура идеальными. Тогда

$$R_{12} \cdot V_1 + R_{32} \cdot V_3 + R_{45} \cdot V_4 + R_{65} \cdot V_6 = 0. \quad (10)$$

Из уравнения (9) следует

$$R_{H1} \cdot V_{H1} + R_{H2} \cdot V_{H2} = 0. \quad (11)$$

С учетом выражений (4) получим

$$M_{H1} \cdot \omega_{H1} + M_{H2} \cdot \omega_{H2} = 0. \quad (12)$$

Из уравнения (12) следует, что одна из обобщенных сил должна быть отрицательной, то есть необходимо считать, например, что M_{H2} - момент сопротивления на выходном водиле H_2, а M_{H1} - движущий момент на входном водиле H_1. Таким образом, окажется, что в кинематической цепи с двумя степенями свободы и с замкнутым контуром только одно звено (входное водило H_1) может иметь обобщенную координату (независимую угловую скорость ω_{H1}). Такая кинематическая цепь будет иметь кинематическую определимость, так как формула (12) позволяет при заданных моментах M_{H1} и M_{H2} определить выходную угловую скорость ω_{H2}.

Следовательно, кинематическая цепь с двумя степенями свободы и с замкнутым контуром при наличии только одного входа будет иметь статическую и кинематическую определимость и будет являться механизмом.

Из уравнения (12) следует

$$\omega_{H2} = \frac{M_{H1} \cdot \omega_{H1}}{M_{H2}}. \quad (13)$$

Формула (13) выражает эффект силовой адаптации. - При заданных постоянных параметрах M_{H1} и ω_{H1} входной мощности выходная угловая скорость ω_{H2} обратно пропорциональна заданному переменному выходному моменту сопротивления M_{H2}. Механизм, создающий эффект силовой адаптации, будем называть адаптивным механизмом.

Проверка наличия эффекта силовой адаптации в механизме, изготовленном по схеме, представленной на рис. 1, была выполнена на испытательном стенде (рис. 4).

На стенде электродвигатель размещен слева, электрический генератор, имитирующий полезную выходную нагрузку, размещен справа, адаптивно-

механическая передача размещена в центре между электродвигателем и электрическим генератором.



Рис. 4. Стенд для испытания адаптивно-механической бесступенчато регулируемой передачи

Теоретические результаты согласуются с результатами испытаний на стенде.

Заключение

Парадокс теории механизмов и машин характеризует следующую закономерность: кинематическая цепь с двумя степенями свободы и одним входом, содержащая замкнутый контур, является механизмом.

Доказано, что кинематическая цепь с двумя степенями свободы, содержащая замкнутый контур, имеет дополнительную геометрическую связь, которая обеспечивает определимость цепи при наличии одного входа. Парадоксальная дополнительная связь имеет место на картине скоростей цепи в виде мгновенного относительного центра скоростей сателлита и водила. Эта дополнительная связь может быть представлена конструктивно как пассивная избыточная связь. Парадоксальная связь аналитически связывает силовые и кинематические параметры входа и выхода. Эта дополнительная аналитическая связь является выражением эффекта силовой адаптации, который обеспечивает в механизме преодоление переменной выходной нагрузки при постоянной входной мощности. Механические свойства замкнутого контура позволяют обеспечивать требуемое передаточное отношение самостоятельно, бесступенчато и автоматически без применения устройств управления, изменяющих геометрические параметры механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков И.В. Способ автоматического и непрерывного изменения крутящего момента и скорости вращения выходного вала в зависимости от сопротивления движению и устройство для его осуществления. Описание изобретения к патенту России RU 2 234 626 от 27.03.2004.
2. Иванов К.С., Дмитриева Н.А. Безреактивный двигатель// Авторское свидетельство СССР №769157 от 7.09.1980.
3. Иванов К.С. Передача с автоматически регулируемой скоростью. Предварительный патент республики Казахстан № 3208 от 15.03.1996.
4. Иванов К.С., Ворогушин В.А., Шишкин П.А. Адаптивная зубчатая передача (варианты). Предварительный патент РК №14477 от 13.04.2004.
5. Иванов К.С., Ярославцева Е.К. Способ автоматического и непрерывного изменения крутящего момента и скорости вращения выходного вала в зависимости от сопротивления движению и устройство для его осуществления. Патент России RU № 2398989. 10.09.2010. 10 с.
6. Иванов К.С. Теорема о равновесии замкнутого контура. //Теория механизмов и машин. 2010. Т. 8. №2 (16). С. 85 – 89.
7. Иванов К.С. Теоретические основы зубчатой бесступенчато регулируемой передачи. //Теория механизмов и машин. №2 (16). 2010. Т. 8. С. 36 – 48.
8. Иванов К.С. Оценка работоспособности бесступенчато регулируемой передачи в виде механизма с двумя степенями свободы. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. / Под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 28 – 36.
9. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. М., Наука. 1979. 576 с.
10. Harries John. Power transmission system comprising two sets of epicyclic gears. Patent of Great Britain GB2238090 (A). 1991, 11 p.
11. Ivanov Konstantin S., Almaty, KAZ - Owner of the registered sample. The name - Device of automatic and continuous change of a twisting moment – and changes of a corrected speed of output shaft depending on a tractive resistance. The deed on registration of the registered sample № 20 2012 101 273.1. Day of Registration 02.05.2012. The German patent and firm establishment. Federal Republic Germany. 2012. 12 p.
12. Ivanov K.S. The Question of the Synthesis of Mechanical Automatic Variable Speed Drives. Proceedings of the Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Vol.1, Politechnico di Milano, Italy, August 29/Sept 2, 1995. P. 580 – 584.

13. Ivanov K.S. Discovery of the Force Adaptation Effect. Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science. V. 2. April 1 - 4, 2004, Tianjin, China. – P. 581 - 585.
14. Ivanov K.S. Gear Automatic Adaptive Variator with Constant Engagement of Gears. // Proceedings of the 12th World Congress in Mechanism and Machine Science. Besancon. France. 2007, Vol. 2. – P. 182 - 188.
15. Ivanov K.S. The simplest automatic transfer box. // WCE 2010. World Congress on Engineering 2010 (ICME) London, UK. 2010. - P. 1179 – 1184.
16. Ivanov K.S., Tultaev B. Toothed continuously variable transmission (CVT) – industrial realization. // New Trends in Mechanism and Machine Science. Theory and Applications in Engineering. V. 7. Springer. ISSN 2211-0984. Transactions of 4-th Euro Conference on Mechanisms. Springer. Santander. Spain.18-22 Sept. 2012. PP 329-335.
17. Ivanov K.S. Paradox of mechanics – a basis of creation CVT. //Transactions of 2-d IFToMM Asian Conference on Mechanisms and Machines Science. November 7-10, 2012, Tokyo, Japan. P. 245 – 264.
18. Samuel J. Crockett. Shiftless, continuously-aligning transmission. Patent of USA 4,932,928, Cl. F16H 47/08, U.S. Cl. 475/51; 475/47.1990, 9 p.

УДК 621.01
В.И.Каразин, С.В.Колесников, С.Д.Литвинов, А.А. Суханов, И.О. Хлебосолов

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО ВИБРОУДАРНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО СТЕНДА



Владимир Игоревич Каразин, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-4845, E-mail: tmm-russia@mail.ru



Сергей Васильевич Колесников, д.т.н.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Россия, Саров
Тел.: +7 (83130) 20296



Сергей Дмитриевич Литвинов
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Россия, Саров
Тел.: +7 (83130) 42866



Александр Алексеевич Суханов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 552-7801, E-mail: Alexeevich@post.ru



Игорь Олегович Хлебосолов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-4845, E-mail: khlebosolov@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы моделирования широкополосного виброударного воздействия. Найдены оптимальные параметры виброударного механического стенда, воспроизводящего заданный ударный спектр.

Ключевые слова: виброударное воздействие, механический стенд, ударный спектр.

V.I.Karazin, S.V.Kolesnikov, S.D.Litvinov, A.A.Sukhanov, I.O.Khlebosolov

PARAMETER OPTIMIZATION OF BROADBAND VIBROSHOCK MECHANICAL STAND

Dr. Sc. Vladimir I. Karazin[1], e-mail: tmm-russia@mail.ru;
Dr. Sc. Sergey V. Kolesnikov[2];
Sergey D. Litvinov[2];
Dr. Alexander A. Sukhanov[1], e-mail: Alexeevich@post.ru;
Dr. Igor O. Khlebosolov[1], e-mail: khlebosolov@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2]Russian Federal Nuclear Center, All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Russia.

Abstract

The paper deals with modeling of broadband vibroshock impact. . It is obtained optimal parameters vibroshock mechanical stand which reproduce the specified shock spectrum.

Key words: vibro impact, mechanical stand, shock spectrum.

1. Назначение и технические требования

Виброударные воздействия воспроизводятся на виброударных механических стендах (ВУМС), предназначенных для проведения испытаний различных устройств на прочность при механических вибрациях вдоль заданного направления [1-5,7]. ВУМС должен обеспечить воспроизведение следующих основных характеристик виброударного воздействия: диапазон воспроизводимых частот: 100 – 5000 Гц; пиковые значения ускорения: 1000 – 20000 м/с^2; ударный спектр (УС) должен располагаться в заданных пределах с допуском неравномерности ± 30 % от среднего значения. Для обеспечения таких широких возможностей стенда требуется оптимизация его параметров, чему и посвящена настоящая работа.

2. Большой виброударный механический стенд (ВУМС)

Приобретенный колоссальный опыт при разработке и изготовлении малогабаритного виброударного механического стенда (МВМС) [1] показал принципиальную жизнеспособность, перспективность и работоспособность предложенного инженерно-технического исполнения виброударного механического стенда (ВУМС) на основе падающего цилиндрического резонатора. Вместе с тем, натурные испытания МВМС выявили и определенные проблемы, обусловленные наличием плохо моделируемых и силь-

но искажающих и смягчающих вибрации болтовых соединений.

Учитывая все эти обстоятельства, основное внимание при разработке ВУМС было уделено поиску конструкций с минимальным количеством соединительных элементов. При этом большое число сосредоточенных масс (колец) создавало предпосылки для обеспечения лучшей равномерности ударного спектра. С другой стороны, бóльшая масса резонатора приводит к большой ударной энергии и, как следствие, значительным механическим напряжениям в «узких» местах резонатора. Только по этой причине были отвергнуты многие интересные конструктивные решения.

2.1. Некоторые возможные варианты резонаторов ВУМС

Были рассмотрены и исследованы около десятка различных вариантов конструктивного исполнения резонаторов ВУМС. В частности, с традиционными двумя мембранами по краям цилиндров, с одной мембраной сверху, в центре и снизу, с кольцами разной высоты и т.д. Часть из них была отклонена из-за недопустимо больших механических напряжений, возникающих в момент соударения резонатора с неподвижной опорной поверхностью, часть вариантов оказалась нетехнологичной для изготовления, часть – не удовлетворяла каким-либо техническим требованиям Заказчика.

На рис. 1 и 5 представлены два наиболее интересных варианта резонаторов из всего множества рассмотренных и исследованных.

На рис. 2–4 и 6–8 представлены результаты компьютерного динамического анализа в системе Ansys соответствующих резонаторов при высоте падения 0.5 м. «Датчик» ускорения расположен в центральной точке стола.

Первый резонатор (рис. 1) выполнен из двух почти симметричных частей, соединенных по торцевым поверхностям цилиндров. У данного резонатора возникают недопустимо большие механические напряжения.

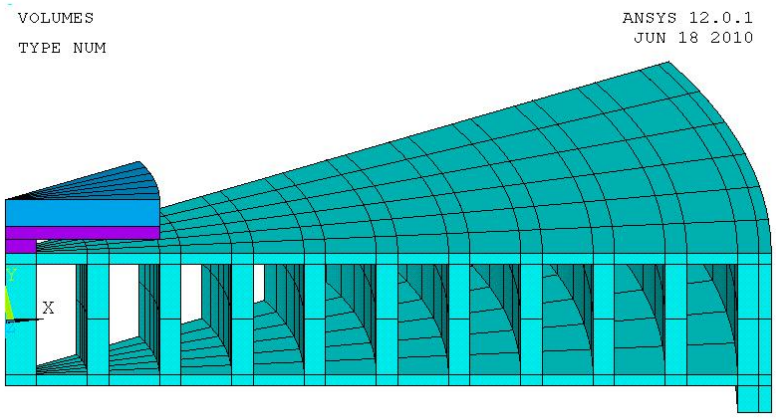


Рис. 1. Резонатор ВУМС в сборе. 1/12 модели

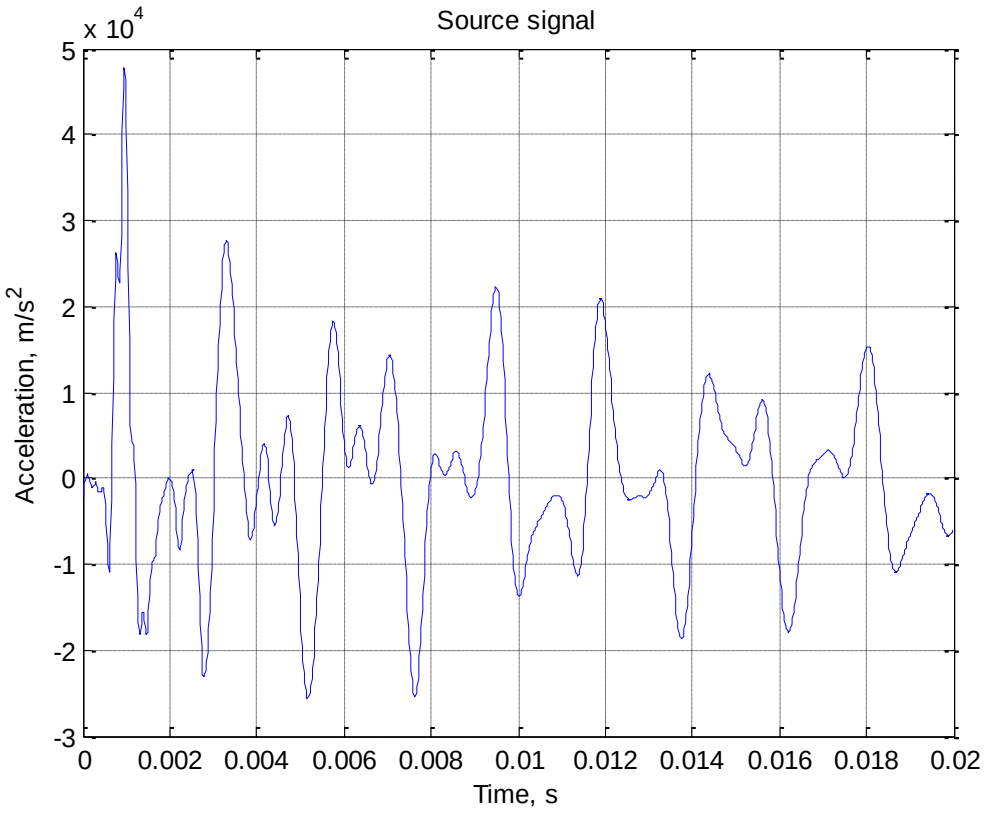


Рис. 2. Ускорение

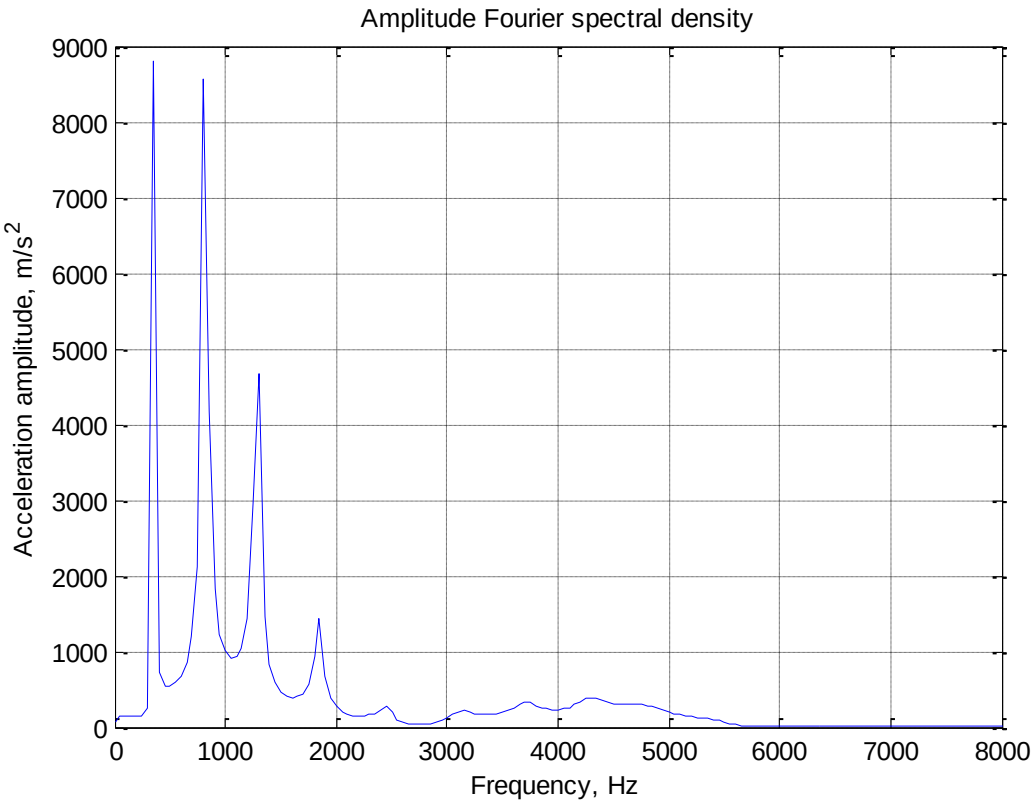


Рис. 3. Спектр Фурье по ускорению

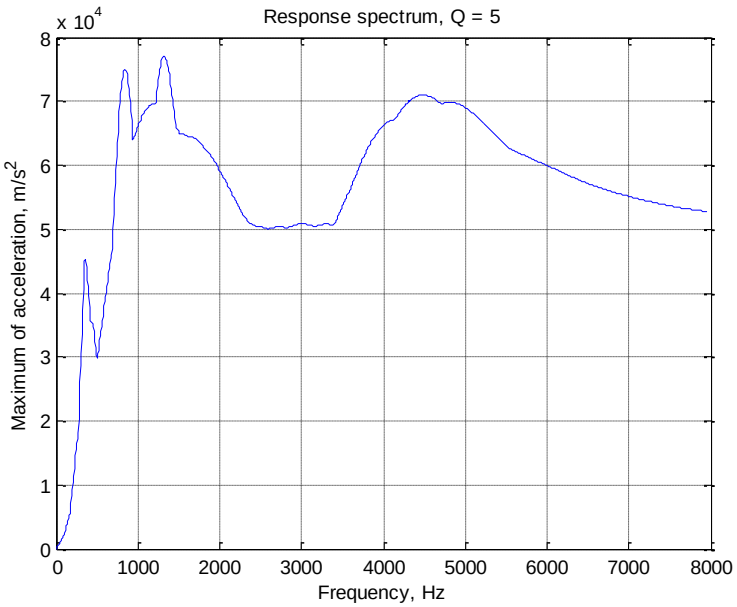


Рис. 4. Ответный (ударный) спектр по ускорению. Разброс ± **20 %**

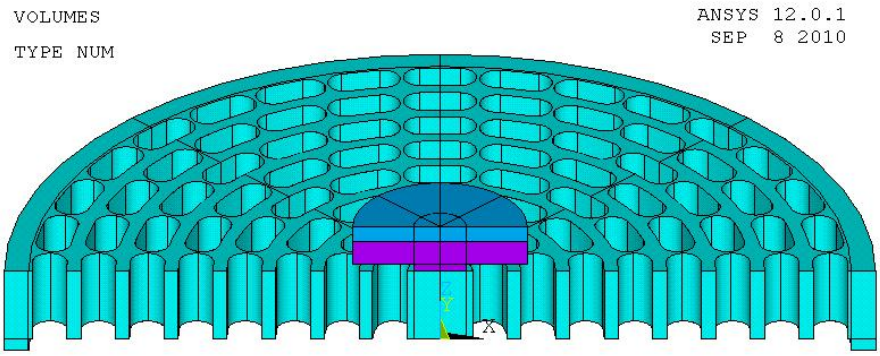


Рис. 5. Резонатор ВУМС в сборе. ½ модели

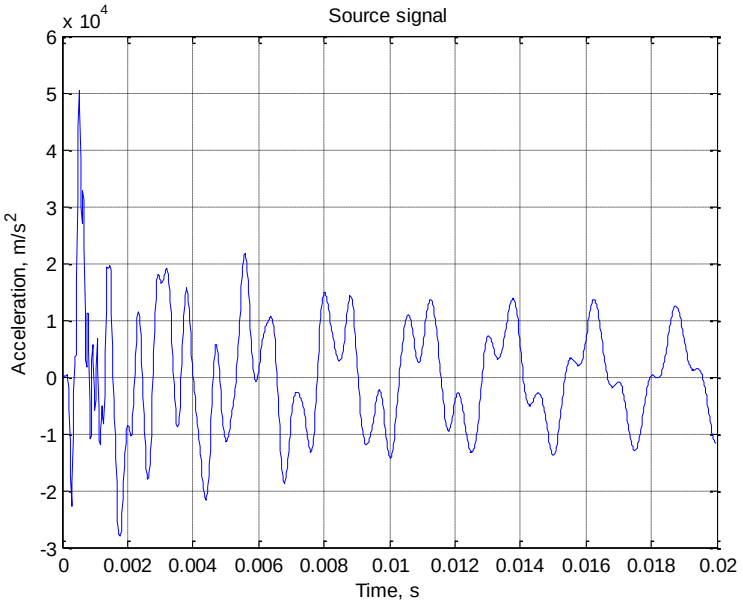


Рис. 6. Ускорение

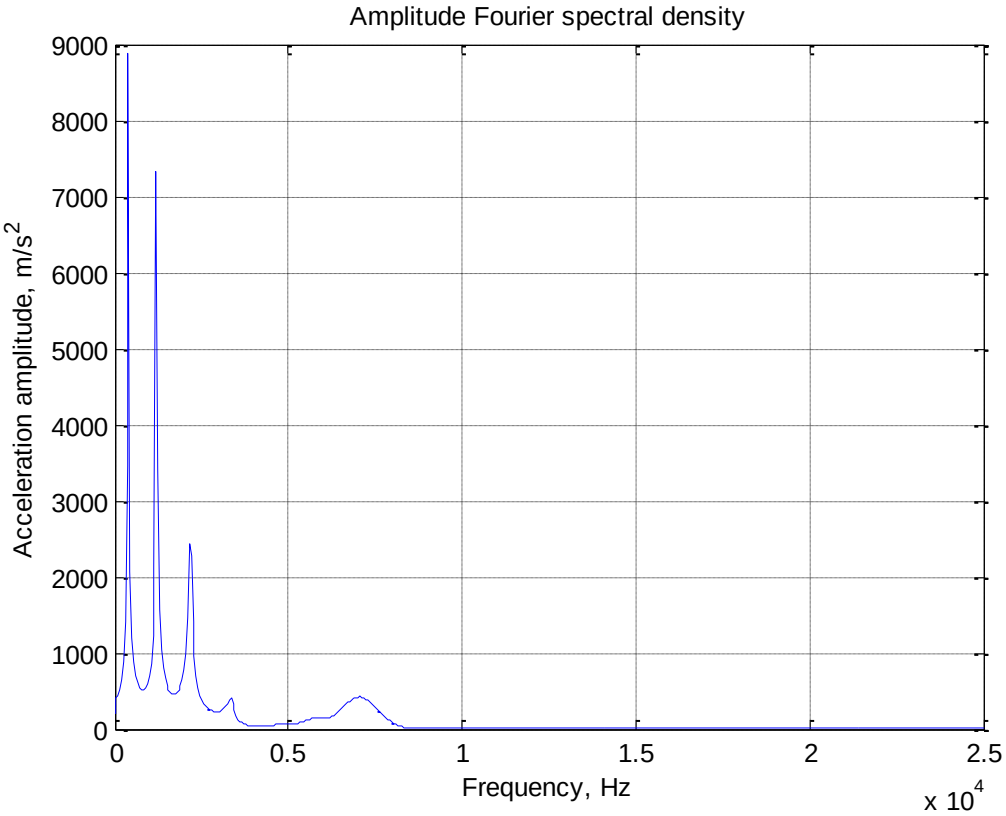


Рис. 7. Спектр Фурье по ускорению

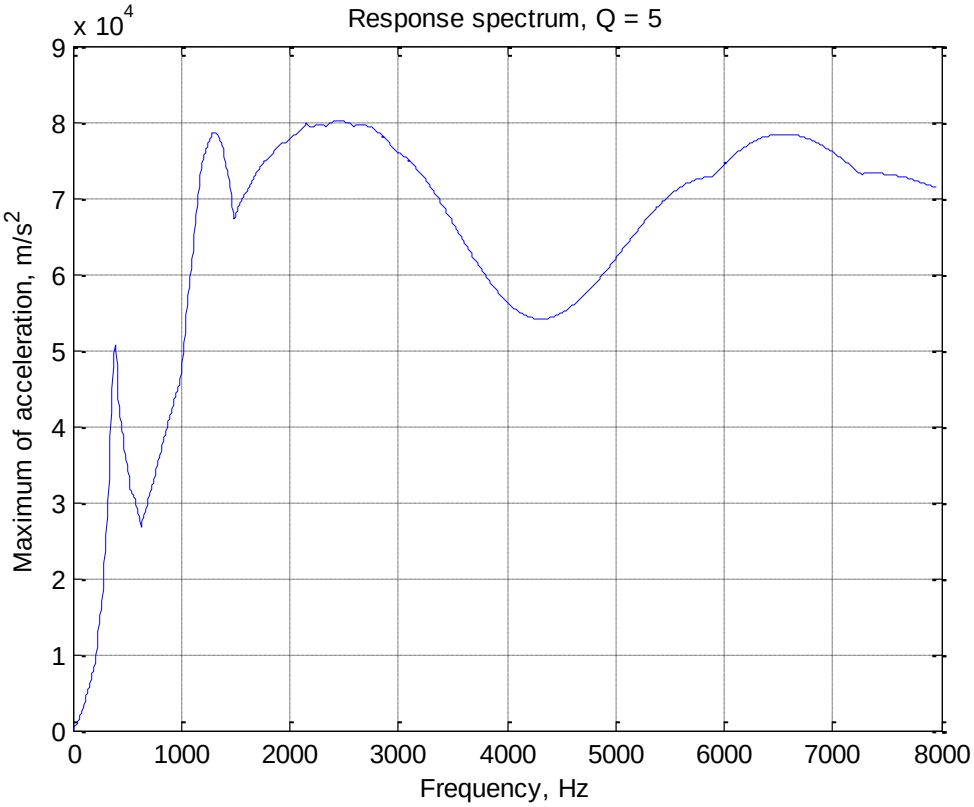


Рис. 8. Ответный (ударный) спектр по ускорению. Разброс ± **18.5 %**

Второй резонатор (рис. 5) представляет собой монолитную конструкцию, что является несомненным преимуществом. Однако он нетехнологичен для изготовления и также «страдает» большими возникающими механическими напряжениями.

2.2. Оптимальный резонатор ВУМС

В результате селекции различных вариантов резонаторов был получен оптимальный монолитный резонатор с точки зрения равномерности ударного спектра при удовлетворении заданным техническим требованиям с некоторым запасом и допустимыми возникающими механическими напряжениями. Конструкция такого резонатора представлена на рис. 9.

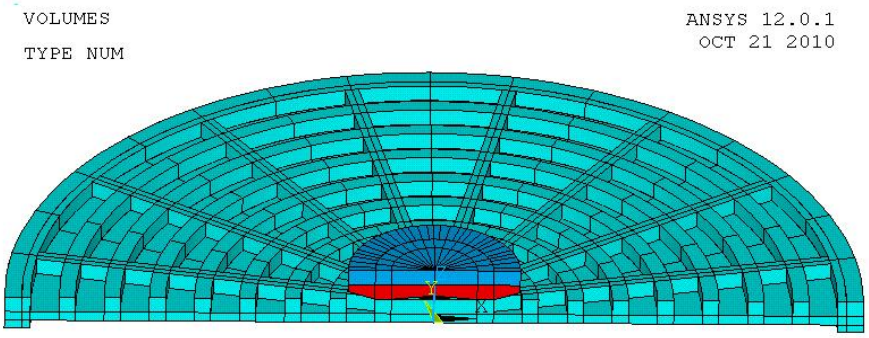


Рис. 9. Резонатор ВУМС в сборе. 1/2 модели

Основные массово-габаритные характеристики оптимального резонатора ВУМС следующие:

- диаметр – 1 м;
- общая высота без изделия – 82 мм;
- диаметр внутреннего сплошного кольца – 138 мм;
- расстояние между кольцами – 33.5 мм;
- толщина колец – 19 мм;
- ширина ребер – 16 мм;
- высота колец и ребер – 20 мм;
- толщина мембраны – 12 мм;
- 8 подвижных колец, включая сплошное центральное;
- 16 ребер;
- стол с изделием размещен на центральном сплошном кольце;
- полная масса резонатора с изделием (5 кг) – 153 кг.

2.3. Модальный анализ ВУМС

Результаты модального конечно-элементного анализа в системе Ansys для первой и седьмой основных форм колебаний на 1/32 части модели представлены на рис. 10-11.

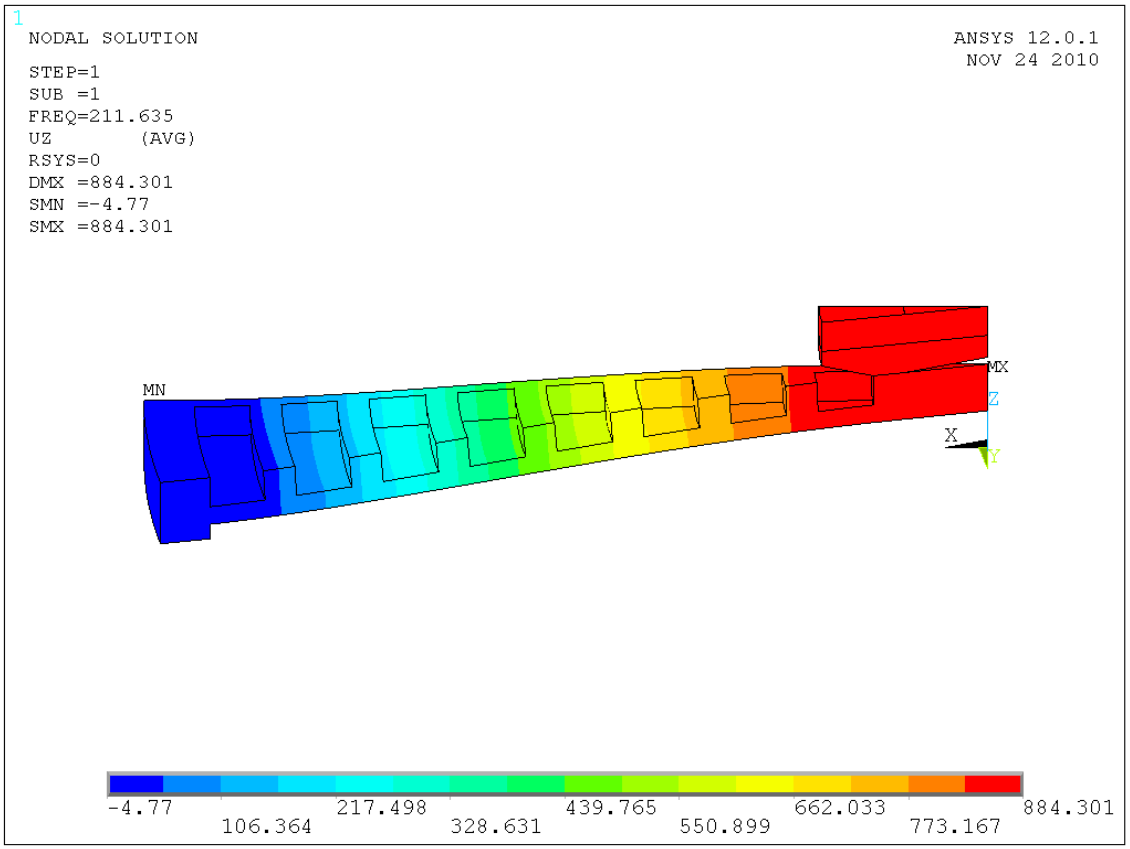


Рис. 10. ВУМС. Первая форма колебаний. Частота 212 Гц

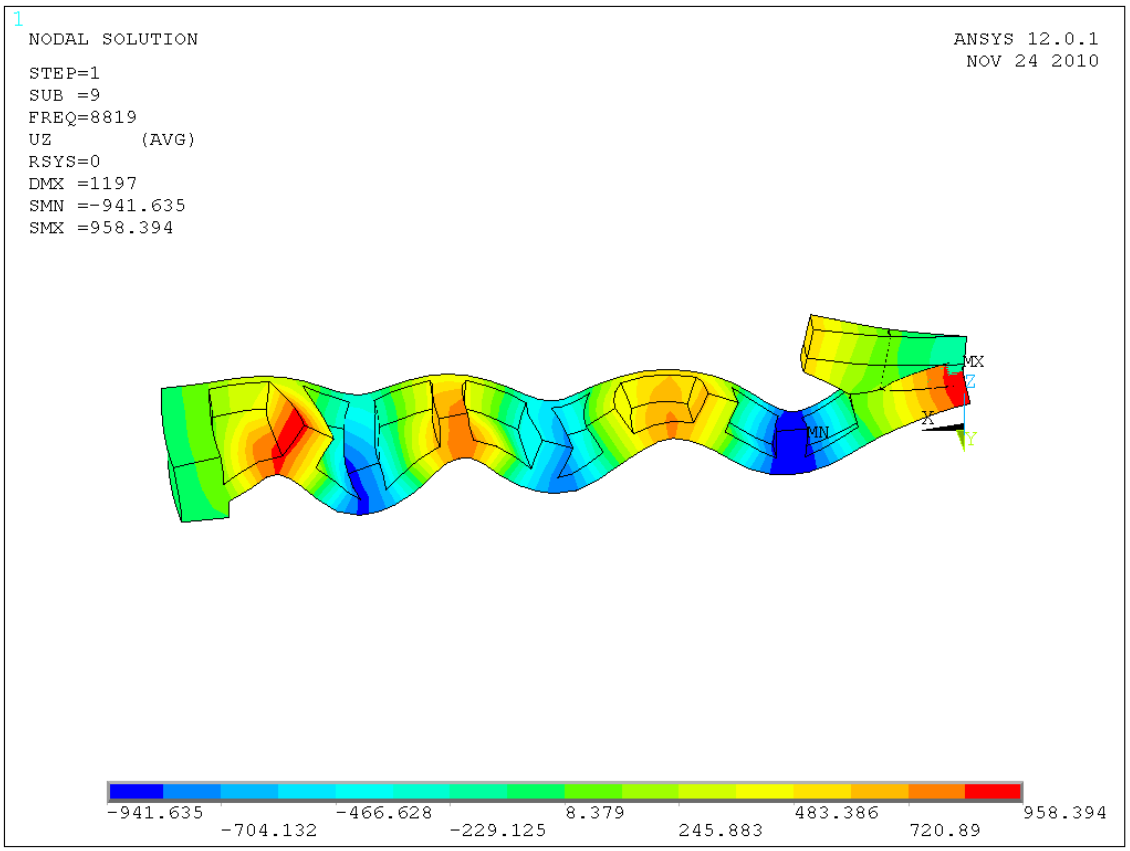


Рис. 11. ВУМС. Седьмая форма колебаний. Частота 8819 Гц

2.4. Возбуждение резонатора ВУМС

Учитывая предыдущий опыт, с целью обеспечения плоско-параллельного падения с большей высоты схема возбуждения резонатора ВУМС должна выглядеть примерно так, как показано на рис. 12.

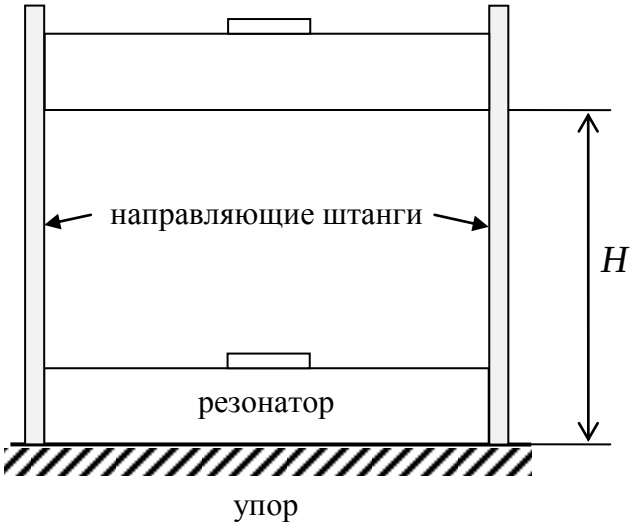


Рис. 12. Система возбуждения

2.5. Динамический анализ ВУМС

Динамический анализ работы ВУМС осуществлялся также в системе Ansys. Обработка результатов моделирования производилась в пакете Matlab при помощи разработанных программ спектрального анализа и определения ответного (ударного) спектра [6].

На рис. 13–15 представлены результаты компьютерного динамического анализа оптимального резонатора ВУМС при высоте падения $H = 0.5 м$. «Датчик» ускорения расположен в центральной точке стола.

На рис.13 представлено вертикальное ускорение центральной точки стола.
На рис.14 представлен спектр Фурье полученного ускорения.
На рис.15 представлен ударный спектр.

2.6. Выводы по результатам моделирования ВУМС

По результатам компьютерного моделирования работы ВУМС можно сделать следующие выводы:

1. Пиковые значения ускорения (рис.13) достигают величины 25000 м/с^2, что на 25 % выше нормативного значения!
2. Частотный спектр (рис.14) соответствует результатам модального анализа (рис.10-11) и располагается в заданном частотном диапазоне.

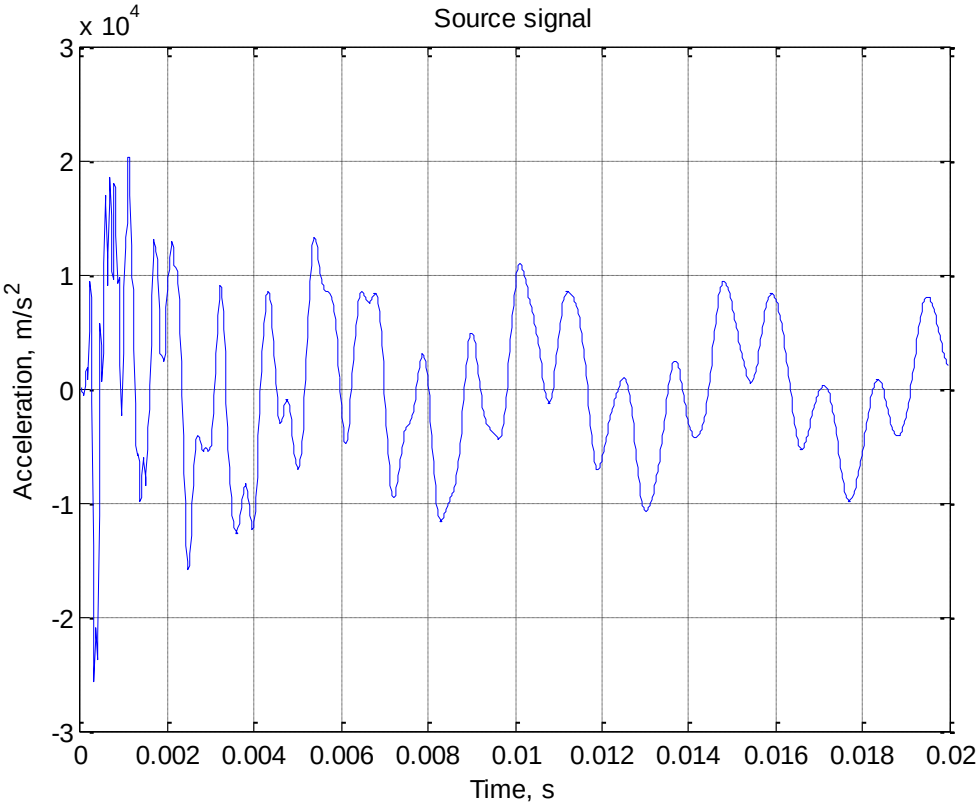


Рис. 13. Ускорение

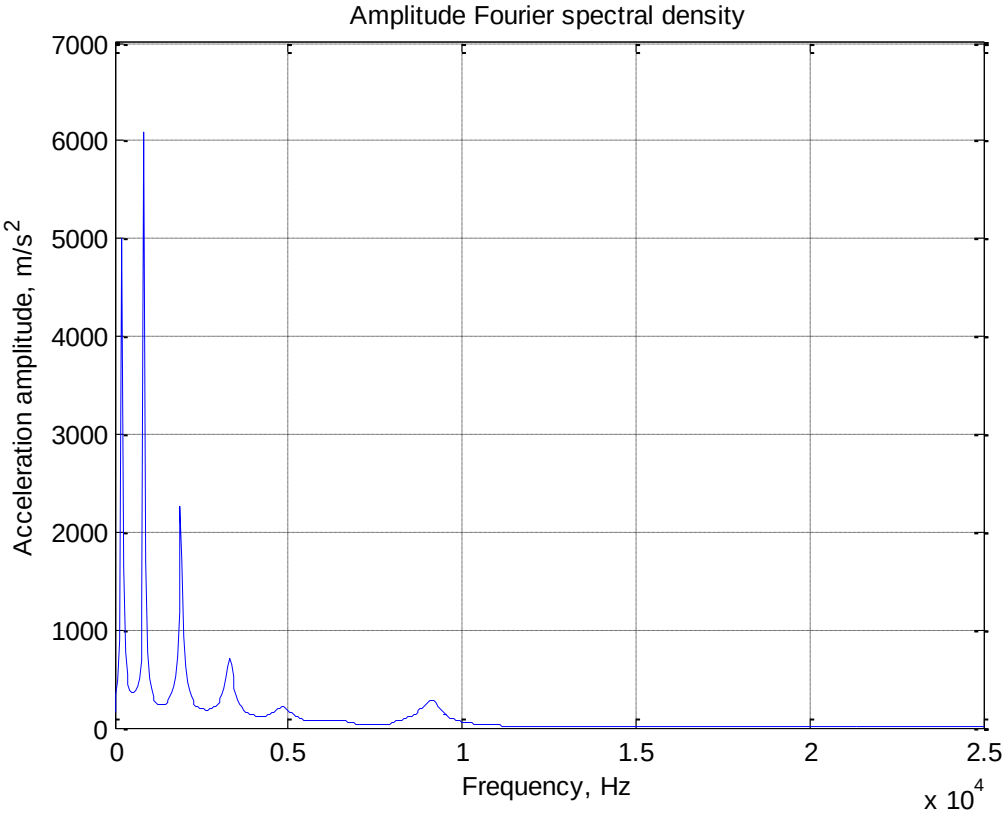


Рис. 14. Спектр Фурье по ускорению

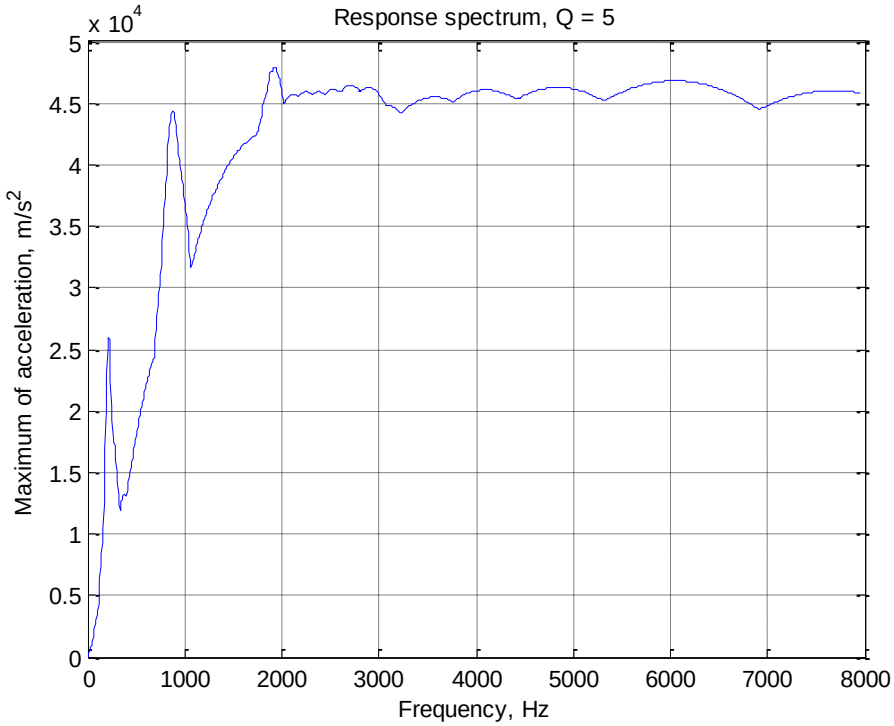


Рис. 15. Ответный (ударный) спектр по ускорению. Разброс ± **3.2 %**

3. Ударный спектр (рис.15) превышает средний требуемый уровень на 30 % и имеет неравномерность разброса всего ± **3.2 %**, что почти в 10 раз меньше нормативного значения!
4. Впечатляющие результаты компьютерного моделирования вынужденных колебаний оптимального резонатора ВУМС с учетом монолитности его конструкции при отсутствии болтовых соединений позволяют скромно надеяться при надлежащем исполнении самого резонатора и системы его возбуждения на достаточно приличное совпадение с результатами натурных испытаний (в отличие от МВМС).
5. Конструкция резонатора позволяет путем заливки полостей легким пористым материалом (например, строительной пенкой) уменьшить время переходного процесса, если такая необходимость возникнет. Дело в том, что компьютерное моделирование внутреннего и внешнего трения в конструкции ВУМС слишком недостоверно ввиду отсутствия надежных характеристик демпфирования материалов и соединительных элементов.
6. Как и в случае с МВМС только натурные испытания дадут окончательную оценку разработанному и изготовленному в металле виброударному механическому стенду.

3. Оптимальный резонатор с демпфирующей прокладкой

Наряду с многочисленными вышеперечисленными достоинствами оптимального резонатора имеется один неприятный недостаток: на ударном

спектре в зоне до 1000 Гц имеются два достаточно больших выброса, выходящих за пределы допустимого коридора. И хотя реальная конструкция, как показывает практика, внесет определенное сглаживающее демпфирование, усовершенствуем, тем не менее, конструкцию, разместив на столе демпфирующую прокладку (рис.16).

На рис. 16 представлена 1/32 модели оптимального резонатора с размещенной на столе демпфирующей прокладкой (обозначена фиолетовым цветом) со следующими свойствами (обычная резина):

- модуль упругости 15 Мпа (у стали 200000 МПа)
- плотность 1500 кг/м^3 (у стали 7850 кг/м^3)
- коэффициент внутреннего демпфирования 0.0003 (у стали 0.000003)

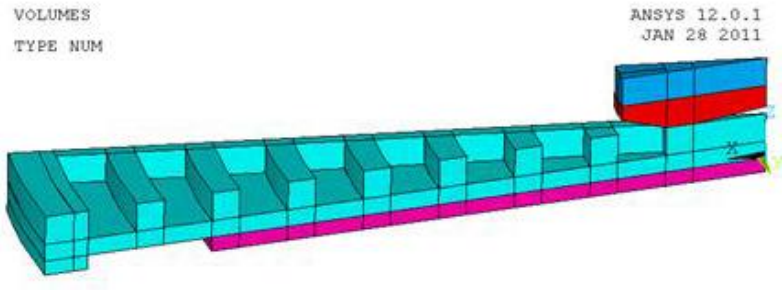


Рис. 16. 1/32 модели оптимального резонатора с демпфирующей прокладкой

На рис. 17-19 представлены результаты компьютерного динамического анализа оптимального резонатора ВУМС с демпфирующей прокладкой при высоте падения $H = 0.5\ м$. «Датчик» ускорения расположен в центральной точке стола.

На рис. 17 представлено вертикальное ускорение центральной точки стола.

На рис. 18 представлен спектр Фурье полученного ускорения.

На рис. 19 представлен ударный спектр.

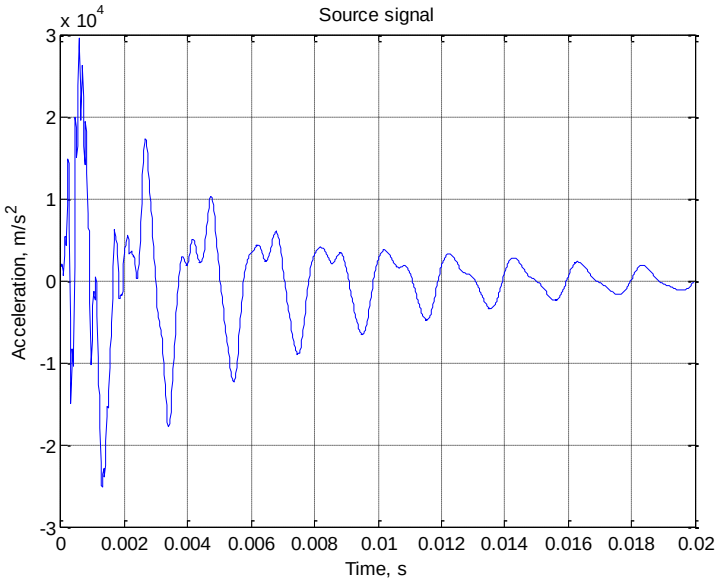


Рис. 17. Ускорение

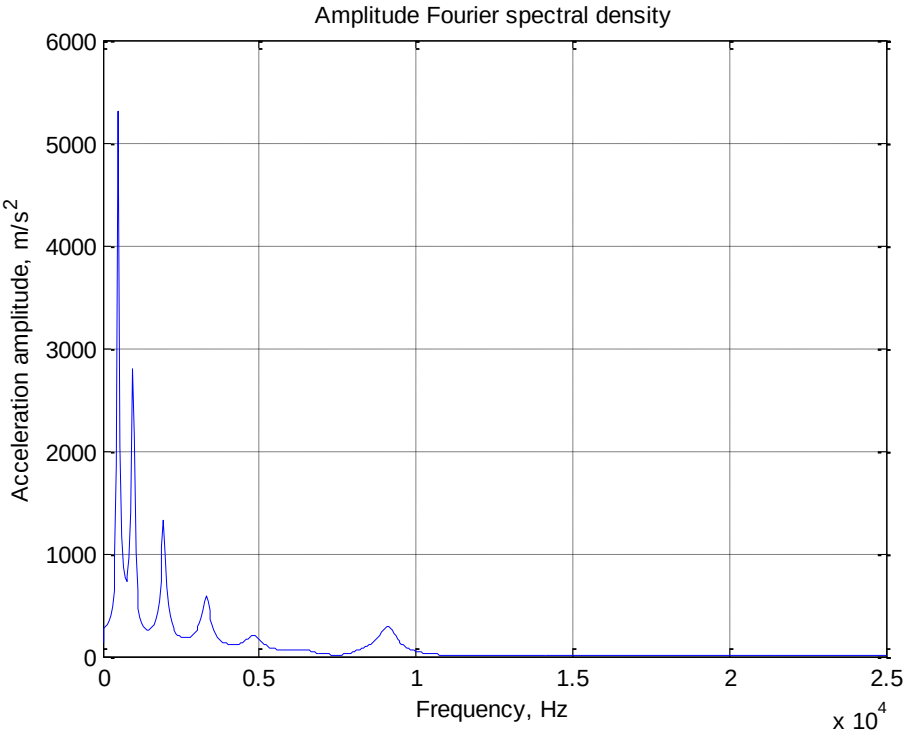


Рис. 18. Спектр Фурье по ускорению

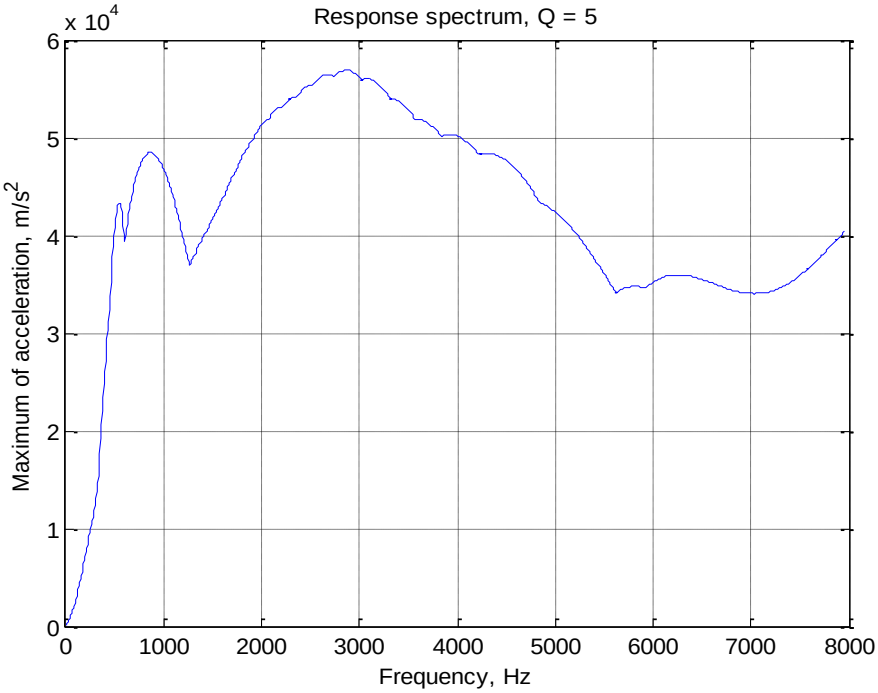


Рис. 19. Ответный (ударный) спектр по ускорению. Разброс ± **21 %**

3.1. Выводы по результатам моделирования ВУМС с демпфированием

ВУМС с размещенной на столе демпфирующей резиновой прокладкой существенно сгладил ударный спектр в диапазоне частот от 0 до 1000 Гц. При этом увеличился разброс ударного спектра в основной частотной

области. Однако он не превышает 21 %, что по-прежнему много меньше нормативного значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яровицин В.С., Литвинов С.Д., Каразин В.И., Суханов А.А., Хлебосолов И.О. Устройство для испытания изделий на виброударные нагрузки. ПАТЕНТ на изобретение № 2348021, 27.02.2009.
2. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. /Ред. совет: В.Н.Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. - Т.4. Вибрационные процессы и машины /Под ред. Э. Э. Лавендела, 1981. - 510 с.
3. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. /Ред. совет: В.Н.Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. - Т.5. Измерения и испытания / Под ред. М.Д.Генкина, 1981. – 496 с.
4. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. – Кн.1, 1982. - 528 с.
5. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т.3. – М.: Машиностроение, 1979. – 560 с.
6. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.И. MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
7. Евграфов А.Н., Каразин В.И., Хлебосолов И.О. О разработках ротационной градуировочной и испытательной техники. Труды СПбГТУ, 2007. №504. С 217-221.

УДК 621.01

В.И. Каразин, Д.П. Козликин, А.В. Хисамов

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ



Владимир Игоревич Каразин – Санкт-Петербург, Россия, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, д.т.н., профессор кафедры «Теория механизмов и машин»
тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: tmm-russia@mail.ru



Денис Петрович Козликин – Санкт-Петербург, Россия, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, к.т.н., доцент кафедры «Теория механизмов и машин»
тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: tmm-russia@mail.ru



Андрей Владимирович Хисамов – Санкт-Петербург, Россия, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, магистр техники и технологии, аспирант кафедры «Теория механизмов и машин»
тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: andrey@k-digital.ru

Аннотация

Работа посвящена оценке точности проведения прецизионных испытаний на центробежных стендах. При вращении ротор центрифуги неизбежно деформируется, что влияет на точность воспроизведения заданного ускорения. В некоторых случаях вместо сложных систем обратной связи предлагается использовать коррекцию ошибки с помощью спрогнозированных расчетных данных.

Ключевые слова: испытательное оборудование, центрифуги, удлинение ротора, компьютерное моделирование.

V.I. Karazin, D.P. Kozlikin, A.V. Khisamov

CALCULATING FEATURES OF CENTRIFUGE ROTOR STRAIN

Dr. Sc. V.I. Karazin[1], e-mail: tmm-russia@mail.ru;
Dr. D.P. Kozlikin[1], e-mail: tmm-russia@mail.ru;
A.V. Khisamov[1], e-mail: andrey@k-digtial.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

The paper deals with issue of precision test accuracy estimation with centri-

fuge stands. When the rotor spins it inevitably strains, what affects the accuracy. In some cases, instead of complex feedback systems is proposed to use error correction with predicted estimates.

Key words: test equipment, centrifuge, rotor extension, computer modeling.

Центрифуга как средство воспроизведения нормированного линейного ускорения используется для градуировки элементов навигационных систем [1]. Воспроизводимый параметр (ускорение) определяется уравнением:

$$a = \omega^2 \cdot r\,, \tag{1}$$

где: ω - угловая скорость ротора центрифуги; r - расстояние от оси вращения ротора центрифуги до точки положения центра масс испытуемого прибора [2].

Погрешность определения радиуса является составляющей погрешности воспроизводимого ускорения. Существуют различные методы измерения статических деформаций ротора и удлинений от центробежных сил в процессе вращения [3]. Однако, применение таких систем и методов не всегда целесообразно в связи с условиями эксплуатации оборудования, возможностью их аттестации и другим причинам.

Современные вычислительные программы обладают большими возможностями и могут частично решить поставленные расчетные задачи. Цель настоящей работы состоит в оценке возможного удлинения ротора, состоящего из одной или нескольких штанг. На основании простых моделей сделаем сравнение аналитических результатов и результатов компьютерного моделирования в системе SolidWorks Simulation. На основании полученных результатов следует сделать вывод о достоверности компьютерного расчета более сложных моделей, аналитическое описание которых в некоторых случаях невозможно.

При испытании акселерометров на градуировочных центробежных стендах важным аспектом является учет возникновения различных ошибок. При удлинении ротора центрифуги неизбежно меняется положение стола с испытуемым прибором, следовательно увеличивается расстояние от оси вращения ротора до центра масс испытуемого прибора. Прогнозирование возможного удлинения ротора позволяет системе управления с большей точностью воспроизводить заданные параметры движения [4].

Удлинение ротора происходит под действием центробежной силы, действующей на ротор. Поскольку предполагается, что деформации штанг при вращении ротора незначительны, численно найти удлинение возможно используя закон Гука:

$$\sigma = \mathrm{E} \cdot \varepsilon\,, \tag{2}$$

где σ - нормальное напряжение; E - модуль упругости; ε - относительное удлинение.

Нормальное напряжение в поперечном сечении составляет:

$$\sigma = \frac{F}{\mathrm{S}}, \tag{3}$$

где F - сила, под действием которой удлиняется стержень; S - площадь поперечного сечения.

Таким образом, относительное удлинение составляет:

$$\mathrm{E} \cdot \varepsilon = \frac{F}{\mathrm{S}} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{F}{\mathrm{E} \cdot \mathrm{S}} \tag{4}$$

При вращении на ротор центрифуги действует центробежная сила:

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot R\,, \tag{5}$$

где m - масса груза; R - расстояние от оси вращения до груза.

Расчетное удлинение ротора:

$$\Delta l = l_0 \cdot \varepsilon = \frac{F \cdot \varepsilon}{\mathrm{E} \cdot \mathrm{S}}, \tag{6}$$

где Δl - удлинение ротора центрифуги; l_0 - первоначальная длина ротора.

Однако в большинстве случаев длина ротора существенна и необходимо при расчете удлинения учитывать не только массу груза, но и собственную массу удлиняемого стержня [5, 6]. Рассмотрим удлинение стержня под действием центробежной силы от собственной массы. Для этого разобьем весь стержень на множество частей и запишем определение центробежной силы как функцию от длинны учтенных частей:

$$F(x) = m(x) \cdot \omega^2 \cdot R(x)\,, \tag{7}$$

где x – текущая (учтенная) часть стержня; $m(x)$ – масса оставшихся $(l_0 - x)$ частей стержня; $R(x)$ - расстояние от оси вращения до точки положения центра масс оставшихся частей стержня.

На рис. 1 изображена схема изменения размеров, в зависимости от аргумента x.

Выразим массу заштрихованной на рисунке 1 области через x:

$$m(x) = V(x) \cdot \rho = S \cdot (l - x) \cdot \rho\,, \tag{8}$$

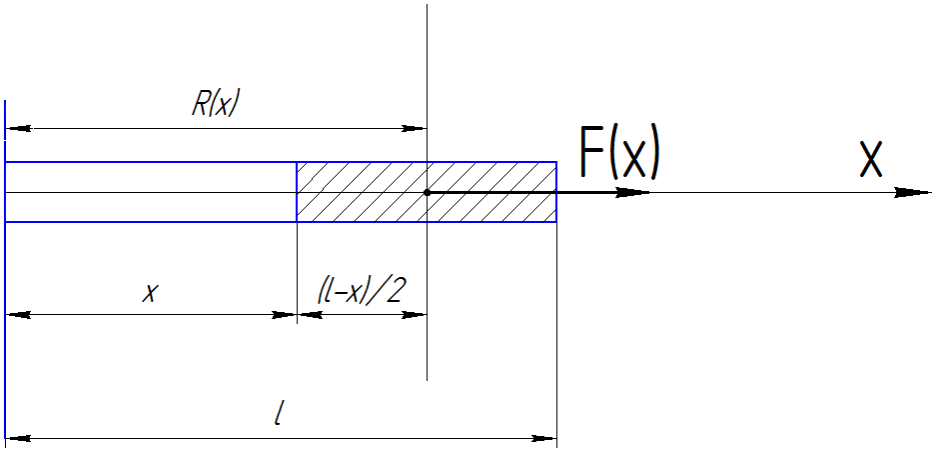


Рис. 1. Удлинение штанги

где $V(x)$ - объем заштрихованной на рисунке 1 (рассматриваемой) части, выраженный как произведение площади поперечного сечения и длины рассматриваемой части; S - площадь поперечного сечения исследуемого стержня; ρ - плотность материала, используемого при изготовлении стержня.

Из рисунка 1 видно, что:

$$R(x) = x + \frac{l-x}{2} = \frac{1}{2} \cdot (x + l) \tag{9}$$

Запишем выражение $F(x)$ с помощью рассмотренных функций от x:

$$F(x) = (l-x) \cdot S \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \left(x + \frac{l-x}{2}\right) = \frac{s \cdot \rho \cdot \omega^2}{2}(l^2 - x^2) \tag{10}$$

Выразим нормальное напряжение как зависимость от x, используя выражения, полученные выше:

$$\sigma(x) = \frac{F(x)}{S} = E \cdot \varepsilon(x)\,, \tag{11}$$

где $\varepsilon(x) = \frac{\Delta(\mathrm{d}x)}{\mathrm{d}x}$ - отношение изменения длины малого участка стержня и его первоначальной длины.

Используя данное выражение, получим изменение длины малого участка и проинтегрируем полученное выражение, что бы получить удлинение всего стержня:

$$\Delta(\mathrm{d}x) = \frac{F(x)}{S \cdot E}\mathrm{d}x \tag{12}$$

$$\Delta l(x) = \int_0^l \frac{F(x)}{S \cdot E} \mathrm{d}x \tag{13}$$

$$\Delta l(x) = \int_0^l \frac{S \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot (l^2 - x^2)}{S \cdot E \cdot 2} \mathrm{d}x = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2 \cdot E} (l^2 \cdot x - \frac{x^3}{3}) \tag{14}$$

Чтобы найти изменение длины всего стержня, используем в качестве аргумента полученной функции значение l:

$$\Delta l = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2 \cdot E} \cdot \frac{2}{3} \cdot l^3 = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot l^3}{3 \cdot E} \tag{15}$$

Будем использовать полученное выражение для сравнения получаемых результатов с результатами компьютерного моделирования. В качестве компьютерного эксперимента используем численные результаты моделирования в системе SolidWorks Simulation, полученные методом конечных элементов.

При проведении эксперимента в SolidWorks Simulation необходимо:

1. разработать модель исследуемого механизма;
2. задать материалы для отдельных элементов механизма;
3. установить ограничения на неподвижные элементы;
4. задать требуемую нагрузку;
5. построить сетку твердого тела для использования метода конечных элементов [7].

Результаты, получаемые в системе SolidWorks Simulation, не являются точными. При использовании простых моделей результаты аналитических расчетов и результаты компьютерного моделирования с использованием численных методов должны быть близки друг к другу. Установим в качестве приемлемого результата отклонение не более 1% [8].

Рассмотрим различные варианты, одновременно усложняя компьютерную модель и модифицируя выражение (15).

Прежде всего, проведем эксперимент с простой моделью ротора центрифуги, состоящего из одной штанги круглого сечения без установленного груза. Для проведения эксперимента создадим модель, состоящую из трех элементов:

1. неподвижное основание;
2. вращающийся вал;
3. штанга, имитирующая ротор.

Построенная модель изображена на рис. 2.

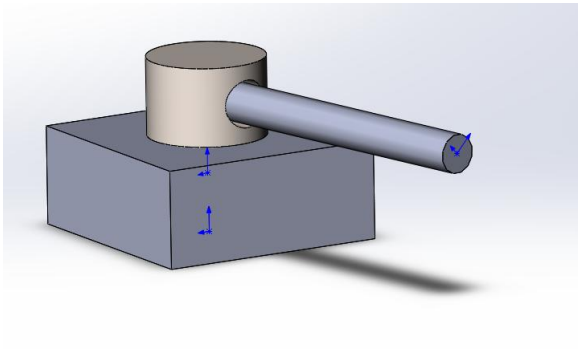


Рис. 2. Модель ротора

Как видно из рис. 2, штанга заходит вглубь вращающегося вала. Такое соединение существенно важно, так как удлинение штанги рассчитывается, начиная от оси вращения. Если штанга присоединена к наружной поверхности вала, то возникает необходимость учета смещения начала штанги от оси вращения.

В качестве материалов зададим легированную сталь со следующими используемыми в расчете характеристиками:

$$\rho = 7700\ {}^{кг}/_{м^3},\ E = 2{,}1 \cdot 10^{11}\ {}^{Н}/_{м^2}$$

Так как мы исследуем удлинение ротора, а не деформацию всей системы, зададим принудительно иной (более чем на 10 порядков выше) модуль упругости для вращающегося вала:

$$E = 2{,}1 \cdot 10^{26}\ {}^{Н}/_{м^2}$$

Увеличенный модуль упругости позволяет при моделировании системы считать вращающийся вал абсолютно жестким.

Закрепим основание и приложим к валу центробежную нагрузку с угловой скоростью:

$$\omega = 30\ {}^{рад}/_{с}$$

Меняя длину штанги l, сравним результаты:

Таблица 1

длина штанги l, мм	Δl, полученная по аналитической формуле, мм	Δl, полученная в SolidWorks Simulation, мм	Разница между полученными значениями, %
1000	0,011	0,0109	0,909091
1300	0,0242	0,024	0,826446
1700	0,054	0,0538	0,37037
2100	0,1019	0,1016	0,294406
2500	0,1719	0,1715	0,232693
3800	0,6036	0,6026	0,165673
5000	1,375	1,3733	0,123636

Как видно из таблицы 1, разница между полученными значениями не превышает 1%, что является погрешностью численного метода конечных элементов.

Перейдем к более сложной модели. В большинстве случаев, требуется учесть не только удлинение ротора под собственным весом, но и удлинение, вызванное наличием испытуемого прибора.

Установим на конец штанги груз. Будем считать, что центр масс груза находится в его геометрическом центре, масса ($m_{гр}$) и длина проекции стороны груза на ось x ($l_{гр}$) известны.

Прежде чем приступить к компьютерному моделированию, модифицируем выражение (15).

Запишем определение центробежной силы с учетом массы груза:

$$F(x) = (m(x) + m_{гр}) \cdot \omega^2 \cdot R_{общ}(x)\,, \tag{16}$$

где: $m_{гр}$ - масса установленного груза; $R_{общ}(x)$ - расстояние от оси вращения до точки положения центра масс системы из нерассмотренного участка стержня и установленного груза.

На рис. 3 изображена схема расположения основных величин.

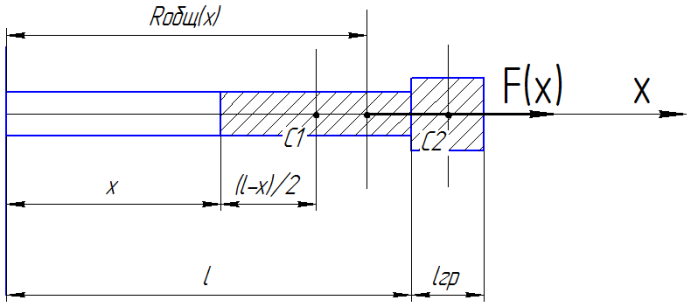


Рис. 3. Удлинение ротора с грузом

При каждом x стоит задача найти $R_{общ}$. Для этого необходимо найти точку положения центра масс системы из двух тел: нерассмотренной части стержня и установленного груза. На рисунке 2 точками C1 и C2 отмечены соответственно центры масс заштрихованной части стержня и груза. Между ними находится центр масс исследуемой системы тел. Найдем положение точки центра масс системы с помощью отношения:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{l_1}{l_2}\,, \tag{17}$$

где l_1 - расстояние от центра масс заштрихованного участка стержня до центра масс системы; l_2 - расстояние от центра масс системы до центра масс установленного груза; m_1 - масса заштрихованной части стержня; $m_2 = m_{гр}$ – масса груза.

Найдем l_2, используя условие, что:

$$l_2 + l_1 = c\,, \tag{18}$$

где c – расстояние между центрами масс заштрихованной части стержня и груза. Данное расстояние можно выразить как зависимость от x:

$$c(x) = \frac{l - x}{2} + \frac{l_{гр}}{2} \tag{19}$$

Выразив l_1 через l_2 и подставив полученное выражение в формулу, получим:

$$l_2 = \frac{l - x + l_{гр}}{2 \cdot \left(\frac{m_2}{m_1} + 1\right)} \tag{20}$$

Так как l_2 - это расстояние между точками положения центров масс системы из двух тел и груза, выразим $R_{общ}$ как:

$$R_{общ}(x) = l + \frac{l_{гр}}{2} - l_2 = l + \frac{l_{гр}}{2} - \frac{l - x + l_{гр}}{2 \cdot \left(\frac{m_{гр}}{m_1} + 1\right)}, \tag{21}$$

Используя полученное выражение, найдем $F(x)$:

$$F(x) = \left(m(x) + m_{гр}\right) \cdot \omega^2 \cdot R_{общ}(x) \tag{22}$$

$$F(x) = \left(S \cdot (l - x) \cdot \rho + m_{гр}\right) \cdot \omega^2 \cdot \left(l + \frac{l_{гр}}{2} - \frac{l - x + l_{гр}}{2 \cdot \left(\frac{m_{гр}}{m_1} + 1\right)} \right) \tag{23}$$

Подставим $F(x)$ в выражение (13) и найдем Δl:

$$\Delta l(x) = \int_0^l \frac{1}{S \cdot E} \left(S \cdot (l - x) \cdot \rho + m_{гр}\right) \cdot \omega^2 \cdot \left(l + \frac{l_{гр}}{2} - \frac{l - x + l_{гр}}{\left(\frac{2m_{гр}}{m_1} + 2\right)} \right) \mathrm{d}x\,, \tag{24}$$

$$\Delta l(x) = \frac{l \cdot \omega^2 \cdot \left(2 \cdot S \cdot \rho \cdot l^2 + 6 \cdot m_{гр} \cdot l + 3 \cdot l_{гр} \cdot m_{гр}\right)}{6 \cdot E \cdot S}, \qquad (25)$$

Варьируя параметры, сопоставим результаты вычислений с использованием полученной формулы и результаты экспериментов в SolidWorks Simulation. Используем ту же модель, что изображена на рисунке 2, но добавим на свободный конец ротора абстрактный груз. Трехмерная модель ротора центрифуги с установленным грузом изображена на рис. 4.

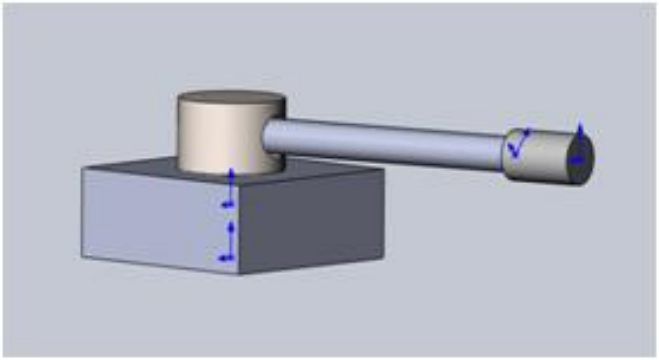


Рис. 4. Модель ротора с грузом

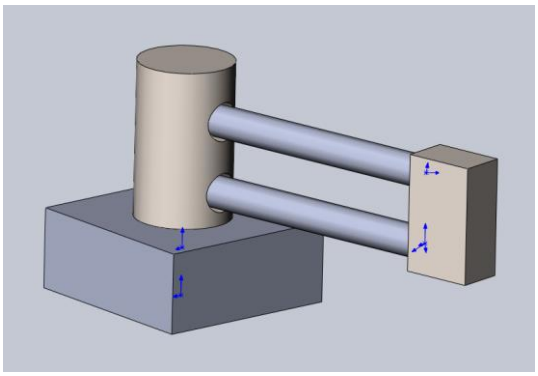


Рис. 5. Модель ротора с двумя штангами

Сведем данные, полученные в результате эксперимента в таблицу 2, и дополним расчетными значениями, получаемыми через выражение (25).

Таблица 2

длина штанги l, мм	длина груза $l_{гр}$, мм	Масса груза $m_{гр}$, кг	Δl, полученная по аналитической формуле, мм	Δl, полученная в SolidWorks Simulation, мм
1300	300	70,69	0,0613	0,0612
1300	300	141,37	0,0984	0,0985
1300	500	141,37	0,1035	0,1036
2500	500	141,37	0,4426	0,4427
3700	500	141,37	1,1327	1,1327

Как видно, разница между аналитическими вычислениями и результатами эксперимента не превышают 1%, что лежит в пределах погрешности численного метода.

При конструировании центрифуг, может возникнуть необходимость использования нескольких штанг, соединенных на конце рабочим столом. Компьютерная модель такой центрифуги изображена на рисунке 5.

Если груз соединен со штангами с равными расстояниями между кромками и штангами, то приемлемо использовать формулу:

$$m_2 = \frac{m_{гр}}{N}, \tag{26}$$

где N – количество штанг.

Меняя длину штанги l, сравним результаты:

Таблица 3

длина штанги l, мм	Δl, полученная по аналитической формуле, мм	$\Delta l_{усред}$, полученная в SolidWorks Simulation, мм
1000	0,0496	0,0492
1300	0,0875	0,0873
1700	0,1596	0,1598
2100	0,2605	0,2603
2500	0,3943	0,3940

При получении результатов, приведенных в таблице, использовалась $\Delta l_{усред}$ – среднее от восьми различных значений Δl, полученных в SolidWorks Simulation из различных точек наблюдения, равномерно расположенных на дальней кромке штанги. Во всех случаях наибольшая разница между минимальной и максимальной Δl не превышала 10 мкм.

Перейдем от простых моделей к более сложной, которая максимально схожа с реальным ротором центрифуги. На рисунке 6 изображена модель ротора центрифуги с четырьмя штангами. Составление математической модели такого ротора аналитическим путем возможно, но уже потребует больше времени, в отличие от создания компьютерной модели [9]. В тоже время, можно упростить аналитическую модель. Попробуем сравнить значения удлинения ротора, полученные с помощью упрощенной математической модели и с помощью компьютерной модели.

Обратим внимание на элемент «А», изображенный на рис. 6. Данный элемент вносит дополнительную нагрузку при удлинении штанг, но в то же время не дает им изгибаться из-за смещения относительно центральной оси вращения.

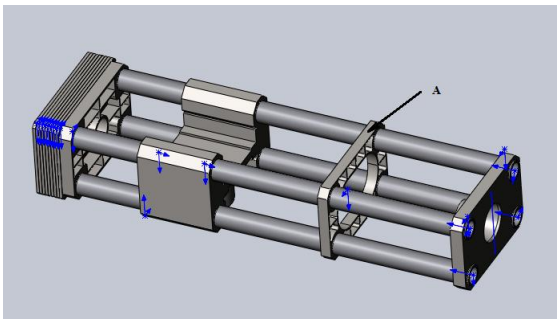


Рис. 6. Трехмерная модель ротора

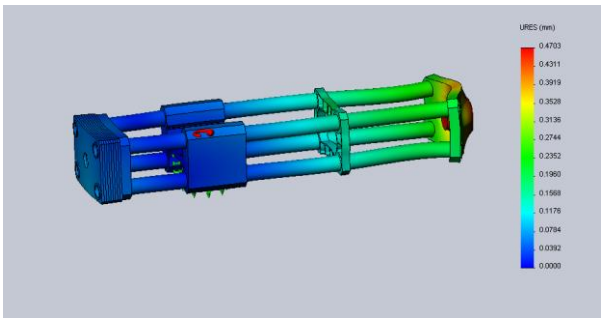


Рис. 7. График деформации ротора

Для учета указанного элемента необходимо вносить дополнительную массу. Алгоритмически это можно задать как условие:

$$\text{M_cen}(x) := \begin{cases} \text{m_cent} & \text{if } x < \text{l_m} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \qquad (27)$$

где M_cen(x) – алгоритмическая функция, возвращающая значение m_cent при x < значения l_m; m_cent – масса элемента «А» на рисунке 6; l_m – расстояние от оси вращения до элемента «А» на рисунке 6.

С учетом элемента «А» центробежная сила и удлинение штанги будут записаны как:

$$F(x) = (m(x) + m_{гр} + M_cen(x)) \cdot \omega^2 \cdot R_{общ}(x), \qquad (28)$$

$$\Delta l(x) = \int_0^l \frac{1}{S \cdot E}\left(S \cdot (l - x) \cdot \rho + m_{гр} + M_cen(x)\right) \cdot \omega^2 \cdot \cdot \left(l + \frac{l_{гр}}{2} - \frac{l - x + l_{гр}}{2 \cdot \left(\frac{m_{гр}}{m_1} + 1\right)} \right) \mathrm{d}x, \qquad (29)$$

Поскольку $M_cen(x)$ – алгоритмическая функция, зависящая от параметра x, $\Delta l(x)$ необходимо находить численными методами. Для данной модели $\Delta l = 0{,}2419$ мм.

Используем SolidWorks Simulation для проведения эксперимента. На рисунке 7 показан трехмерный график перемещения точек твердого тела. Использован логарифмический масштаб.

Как видно из рисунка, штанги, помимо удлинения, имеют также изгибы. Изгибы в области элемента «А» обусловлены тем, что штанги не проходят через центральную ось вращения ротора центрифуги. Изгибы штанг в области рабочего стола вызваны деформациями стола.

Для получения примерного удлинения каждой из штанг получим значения перемещения в 8 точках на торце каждой штанги и вычислим среднее арифметическое.

Сведем полученные данные в таблицу:

Таблица 4

Штанга 1	0,233650
Штанга 2	0,230086
Штанга 3	0,230629
Штанга 4	0,232629
Среднее удлинение всех штанг	0,231749

Как видно из таблицы, значения удлинений штанг, полученных в SolidWorks Simulation, отличаются друг от друга. Среднее удлинение всех штанг в эксперименте отличается от значения Δl на 4%. Это отличие вызвано наличием не только продольных, но и поперечных деформаций штанг, что не учитывается в выражении (29).

Попробуем определить, насколько сильно влияет полученная разница в 4% на воспроизводимое ускорение. Сравним значения нормальных ускорений испытуемого на центрифуге прибора при использовании полученных удлинений. Деформации стола при этом учитывать не будем. Значения ускорений, полученные с использованием формулы (1) приведены в таблице:

Таблица 5

	Удлинение	$r = l + \Delta l$	a
Δl	$0{,}2419 \cdot 10^{-3}$ м	1,9202419 м	$1.72821770 \cdot 10^{3}\ м/с^2$
$\Delta l_{\text{среднее}}$	$0{,}2317 \cdot 10^{-3}$ м	1,9202317 м	$1.72820853 \cdot 10^{3}\ м/с^2$
Разница			$5.3086 \cdot 10^{-4}$ %

В таблице 5 приведены результаты определения значений удлинения ротора от воздействия центробежной силы двумя методами. Аналитический расчет и компьютерное моделирование показали разницу по фактическому ускорению, не превышающую 10^{-3} %.

В большинстве случаев такая погрешность оценки изменения радиуса до испытуемого прибора вполне приемлема [10]. Полученные результаты исследования позволяют предположить:

1. Для оценки деформаций ротора центрифуги метод компьютерного моделирования дает достоверный результат. Одновременно следует отметить, что уточнение компьютерной модели значительно доступнее, чем аналитическое описание всех конструктивных особенностей расчетной модели.
2. В некоторых случаях можно рекомендовать при испытаниях использование поправок к расчетным параметрам, полученных методом компьютерного моделирования (в частности для изменения радиуса). Эта поправка может заменить достаточно сложное оборудование для измерения деформаций, аттестация погрешности которого является отдельной, не простой задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Н.Евграфов, В.И.Каразин, И.О.Хлебосолов. Воспроизведение параметров движения на ротационных стендах // Теория механизмов и машин. – 2003. – Т.1. – № 1. – С. 92–96.
2. П.А.Андриенко, В.И.Каразин, Д.П.Козликин, И.О.Хлебосолов. Особенности воспроизведения знакопеременных перегрузок // Современ-

ное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Междунар. науч.-практ. Конференции / Под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 133–141.
3. А.Н.Евграфов, В.И.Каразин, Г.А.Смирнов. Роторные стенды для воспроизведения параметров движения // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 1999. №3. С.89-94
4. A.V. Khisamov. Study of centrifuge rotor extension // Теория механизмов и машин. – 2013. – Т.1. – № 1 (21). – С. 90–97.
5. T.Goodman. Centrifuge rotor selection and maintenance // American laboratory. – 2007. – June/July. Vol. 39. – № 12. – P. 12-14.
6. T.Goodman. Selecting Centrifuge Consumables. // G.I.T. Laboratory Journal Europe. – 2009. – № 7-8. – P. 35-37.
7. S.Tamura, Y.Higuchi, Y. Hayashi, M.Yamzasaki. Centrifuge studies on the effects of existing piles on the end resistance and shaft friction of a newpile // Soils and foundations. – 2012. – Vol. 52. – № 6. – P. 1062-1072.
8. F.D.Milne, M.J.Brown, J.A.Knappett, M.C.Davies. Centrifuge modelling of hillslope debris flow initiation // Catena. – 2012. – Vol. 92. – P.162-171.
9. L.M.Hu, H.Z.Lee, J.Wang, J.T.Du. Centrifuge Modeling and Numerical Simulation of Air Sparging Process // Advanced materials research. – 2012. – Vol.378/379, part 2. – P. 445-448.
10. А.Н.Евграфов, В.И.Каразин, И.О.Хлебосолов. О разработках ротационной градуировочной и испытательной техники // Труды СПбГТУ №504 Машиностроение. С.217-221.

УДК 514+531.8

М.Д. Ковалёв

О ДЕКОМПОЗИЦИИ ШАРНИРНЫХ СХЕМ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ФЕРМ



Михаил Дмитриевич Ковалёв, д.ф.-м.н., профессор, Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
Тел.: (499)263-60-18, E-mail: kovalev.math@mtu-net.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены плоские шарнирные фермы с точки зрения геометрической теории вложения графов в плоскость. Исследуется ассуровский подход к построению сложных конструкций. Основным результатом является теорема о том, что вопрос о возможности построения устойчивой и однозначно собираемой конструкции достаточно решить для структурных групп Ассура.

Ключевые слова: вложения графа в плоскость, структурная схема, структурная группа Ассура, геометрическая устойчивость.

M.D.Kovalev

ON DECOMPOSITION OF HINGED SCHEMES AND GEOMETRICAL STABILITY OF TRUSSES

Dr. Mikhail D. Kovalev, Bauman Moscow State Technical University, Russia,
e-mail: kovalev.math@mtu-net.ru

Abstract

The article is devoted to investigation of plain trusses by methods of the theory of embeddings of pinned graphs. Decomposition of complex construction into so called Assur's graphs is applied. The main result is the theorem reducing the question about existence of geometrically stable and uniquely collected construction to the same question for Assur's graphs.

Key words: embeddings of pinned graphs, structural schemes, Assur's graphs, geometrical stability

1. Шарнирные схемы и шарнирники

В работе рассматриваются идеальные плоские конструкции, состоящие из прямолинейных рычагов, имеющих на своих концах шарниры. Этими шарнирами рычаги соединяются между собой и с плоскостью - стойкой. Шарниры, закреплённые в плоскости, обозначаются на рисунках крестиками, и называются закреплёнными, прочие же шарниры обозначаются кружочками и называются свободными. Допускаются и совмещенные шарниры, — когда на одной оси насажено несколько вращательных кинематических пар. Здесь используется не обычный для кинематики подход, а подход основанный на теории вложений графов в плоскость. Соответственно этому понятия структурной схемы и другие понятия теории механизмов определяются несколько иначе, чем к этому привыкли. Терминология тоже несколько меняется, все эти изменения мы опишем по ходу. Например, шарнирной структурной схемой (граф схемой [1, 2, 3] или сокращённо ШСС) мы называем граф, рёбрам которого отвечают рычаги конструкции, а вершинам — шарниры. При этом совмещённым шарнирам отвечает одна вершина.

Итак, шарнирной структурной схемой мы называем связный неориентированный граф $G(V,W,E)$ без петель и кратных ребер, множество вершин которого состоит из двух непустых подмножеств $V = \{v_1,...,v_m\}$ (это кружочки, им отвечают свободные шарниры) и $W = \{v_{m+1}, ...,v_{m+n}\}$ (это крестики, им отвечают закреплённые шарниры) удовлетворяющий тем условиям, что его подграф $G_1(V, E_1)$, порожденный множеством V, связен, а вершины множества W несмежны между собой. Таким образом, множество E ребер графа $G(V, W, E)$ распадается на два подмножества: E_1 — состоящее из ребер v_iv_j, для которых $i, j < m$; и E_2 — из рёбер v_iv_j, с $i < m$, $j > m$. Закрепленной шарнирной схемой (ЗШС) назовем структурную схему, каждому закрепленному шарниру $v_i \in W$ которой сопоставлена некоторая точка p_i плоскости. Если теперь сопоставить и каждому свободному шарниру свою точку плоскости, то мы получим шарнирник $\mathbf{p}= (p_1,p_2,...,p_m)$, отвечающий заданной ЗШС. При этом не исключается совпадение любых двух шарниров как точек плоскости. Шарнирник есть в инженерном понимании либо ферма либо определённое положение шарнирного механизма. Математически шарнирник суть точка $2m$-мерного евклидова пространства параметров (координат свободных шарниров): $\mathbf{p} \in R^{2m}$.

Шарнирной структурной схеме с r рёбрами-рычагами сопоставляется и другое пространство параметров — r-мерное евклидово пространство R^r, координатами в котором являются квадраты длин рычагов. Каждую точку этого пространства $\mathbf{d} = d_{ij}, \ v_iv_j \in E$ мы называем кинематической шарнирной схемой (КШС). Коль скоро задана ЗШС, то возникает отображение между введёнными пространствами параметров $F : R^{2m} \to R^r$, задающееся формулами $d_ij = (p_i — p_j)^2, v_iv_j \in E$. Это отображение называет-

ся рычажным (в англоязычной литературе — "rigidity mapping"). Оно играет ключевую роль при геометрическом рассмотрении шарнирных конструкций. Точки $\mathbf{d} \in R^r$, для которых $F^{-1}(\mathbf{d})$ непусто, будем называть существенными КШС, в противном случае — несущественными. Образ $F(R^{2m})$ рычажного отображения назовём множеством C существенных КШС. Мы называем КШС **d** однократной, если ей отвечает всего лишь один шарнирник **p**, то есть $F^{-1}(\mathbf{d}) = \mathbf{p}$; и неоднократной — в противном случае.

Если dim $C = r$, то рычажное отображение F и соответствующая ЗШС называются правильными. В механике это отвечает отсутствию пассивных связей в конструкции. Правильная ЗШС называется изостатической если $2m = r$. Шарнирники с изостатической ЗШС как правило являются статически определимыми фермами (им отвечает открытое всюду плотное множество в пространстве параметров R^{2m}). Шарнирная структурная схема называется правильной (изостатической), если ей отвечает хотя бы одна правильная (изостатическая) ЗШС.

2. Геометрическая устойчивость

Далее речь пойдёт о геометрической устойчивости шарнирных конструкций с рычагами ненулевой длины. Причём, как правило, мы будем опускать слово „геометрическая" и говорить просто устойчивость. Шарнирную конструкцию естественно называть (геометрически) неустойчивой, если существует сколь угодно малое изменение длин её рычагов, после которого её уже нельзя собрать близко к исходной. Для устойчиво же собираемого шарнирника любая достаточно малая ошибка в размерах его рычагов не помешает собрать близкий к нему шарнирник. На языке нашей модели эти определения выглядят так: шарнирник **p** называется неустойчивым, если найдется такая его шаровая радиуса $\varepsilon > 0$ окрестность $U(\mathbf{p}, \varepsilon) \subset R^{2m}$, что для $\forall \delta > 0$ в δ-окрестности $W(\mathbf{d}, \delta) \subset R^r$ точки $\mathbf{d} = F(\mathbf{p})$ имеется КШС $\mathbf{d}' \notin F(U(\mathbf{p}, \varepsilon))$. Соответственно, шарнирник **p** является устойчивым, если для любой его окрестности $U(\mathbf{p}, \varepsilon) \subset R^{2m}$ найдётся такое $\delta > 0$, что δ-окрестность $W(\mathbf{d}, \delta) \subset F(U(\mathbf{p}, \varepsilon))$. Конечно же устойчивые шарнирники и КШС возможны лишь для правильных ЗШС. Существенная КШС называется [2, 3] устойчивой, если при любом достаточно малом изменении (квадратов) длин рычагов из неё получается снова существенная КШС. Для неустойчивой КШС возможно сколь угодно малое изменение длин рычагов, после которого уже нельзя собрать ни одного шарнирника с так изменёнными рычагами. На геометрическом языке устойчивость КШС означает то, что отвечающая ей точка **d** лежит внутри множества C существенных КШС. Неустойчивым же КШС отвечают точки границы множества C. (На рис. 1 показаны две

шарнирных фермы с одной и той же КШС одна из которых устойчива а другая неустойчива. Во второй ферме шарнир p_4 лежит на одной прямой со смежными ему шарнирами, и при сколь угодно малом укорочении рычагов, выходящих из p_4, эту ферму уже не удастся собрать. Сама же КШС устойчива.)

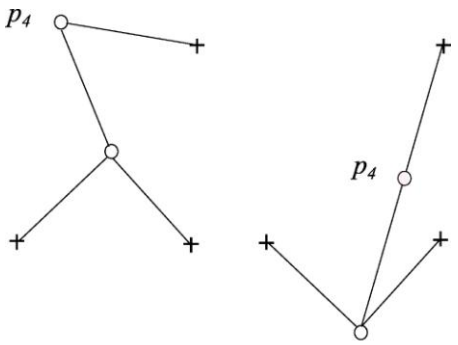


Рис. 1.

Наиболее интересным нерешённым вопросом геометрии шарнирных конструкций является вопрос о существовании устойчивой конструкции, собираемой всего лишь единственным способом. На геометрическом языке: пусть КШС **d** однократна, то есть $F^{-1}(\mathbf{d})$ состоит лишь из одного шарнирника **p.** Может ли быть этот шарнирник устойчив?

Основным результатом данной статьи является теорема 3 вследствие которой поставленный вопрос достаточно решить для конструкций, ЗШС которых являются структурными группами Ассура. Этот вывод основан на возможности составления произвольной конструкции из групп Ассура.

3. Разложение шарнирных схем на группы Ассура

Далее будем рассматривать лишь изостатические структурные схемы. В статье [1] определено понятие структурной группы (графа) Ассура [4] в нашей модели. А именно, *структурной группой Ассура* называется изостатическая ШСС, никакая меньшая часть которой, содержащая закреплённые шарниры, не является изостатической ШСС. В работе [1] также было приведено необходимое и достаточное условие структурной группы Ассура. В самое последнее время группа исследователей из США и Израиля заинтересовалась ассуровским подходом к построению сложных конструкций, в их работах [5, 6] структурные группы Ассура получили название графов Ассура. В работе [5] были получены условия, характеризующие Ассуровы графы, в сле-

дующей равносильной, но более удобной форме. Пусть граф $G(V,W,E)$ удовлетворяет условию $|E|=2m$, а любой его подграф $G'(V',W',E')$ удовлетворяет условиям:

1. $|E'|\le 2|V'|$ если $|W'|\ge 2$,

2. $|E'|\le 2|V'|-1$ если $|W'|=1$,

3. $|E'|\le 2|V'|-3$ если $|W'|=0$.

Назовем эти условия — *условиями закрепления*. Тогда справедлива следующая теорема [5], характеризующая графы Ассура.

Теорема. *ЗШС* $G(V,W,E)$ *является графом Ассура, если для нее выполнены условия закрепления, а для любой ее собственной подсхемы* $G(V',W',E'),1\le|V'|\le|V|,1\le|W'|\le|W|,|E'|\subset|E|$ *выполнено условие* $|E'|<2|V'|$.

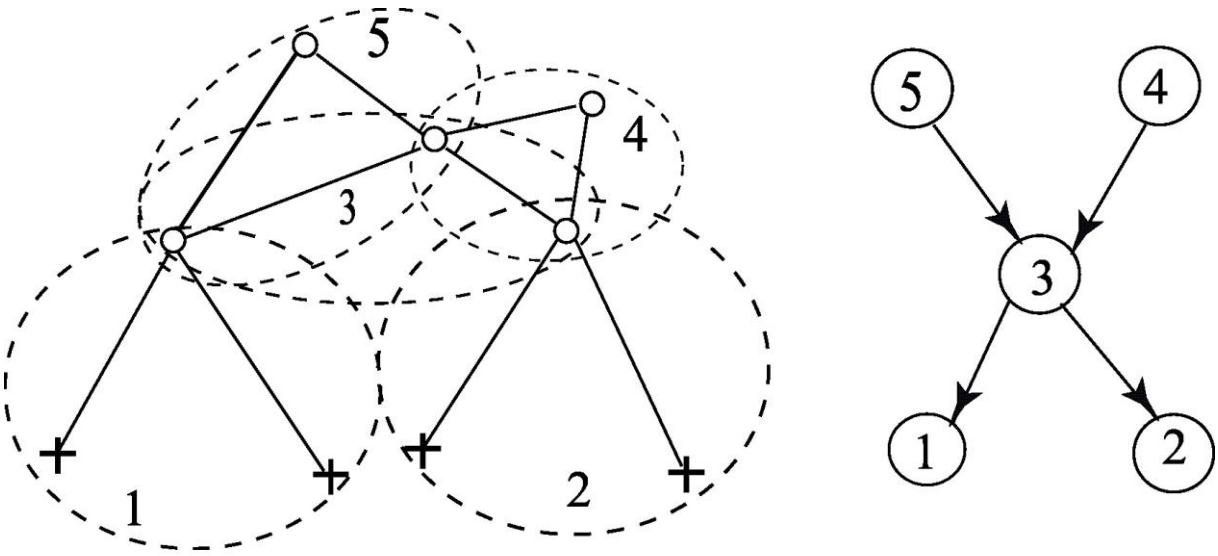


Рис. 2.

Структурную граф схему назовем *разложимой*, если она содержит структурные группы Ассура, отличные от самой схемы. Неразложимые схемы являются графами Ассура. Разложимую схему можно в определенном смысле представить в виде композиции графов Ассура. В работе [5] была доказана теорема об однозначности разложения изостатической ЗШС на графы Ассура. Так ЗШС рис. 2 разлагается на пять графов Ассура. На этих графах Ассура имеется естественный частичный порядок, указанный стрелками. Он отражает то в каком порядке нужно соединять структурные группы, чтобы получить разложимую ЗШС. Эту схему зависимости графов Ассура можно задать ориентированным графом рис. 2. Считается, что

группа B следует за группой A, а A предшествует B, если существует путь из B в A по ребрам этого графа в направлении стрелок. Разлагая ЗШС G в композицию графов Ассура мы берем сначала группы Ассура, которым не предшествует никаких других групп, затем добавляем группы Ассура, которым не предшествует других групп, кроме выбранных на первом шаге, и так далее. Граф Ассура B мы можем добавить лишь тогда, когда были добавлены все предшествовавшие ему графы. Например, для схемы рис. 2 возможны такие представления в виде композиций графов Ассура: $G_1+G_2+G_3+G_4+G_5$ и $G_2+G_1+G_3+G_5+G_4$. Таким образом, композиция однозначна с точностью до перестановки не связанных отношением порядка графов Ассура.

4. Устойчивость разложимых конструкций

Сначала рассмотрим шарнирные схемы, для которых граф $G_1(V,E_1)$ представляет собой дерево. Совокупность всех таких изостатических схем с m свободными шарнирами обозначим D_m. На рис. 3 показана одна из схем совокупности D_4. Каждая схема из D_m представима в виде композиции $G_1+G_2+...+G_m$ так называемых двуповодковых групп Ассура, каждая из которых состоит из свободного шарнира v_i и двух рычагов, один из которых соединяет v_i с закрепленным шарниром, а другой — со свободным шарниром некоторого предшествующего в композиции графа Ассура. Докажем теорему о числе возможных

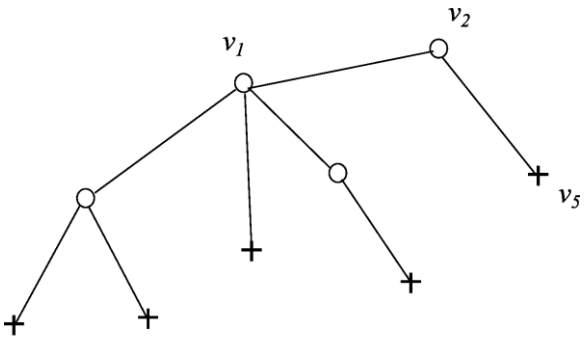


Рис.3

сборок [7] ферм такой структуры.

Теорема 1. *Если число шарнирников, отвечающих КШС со структурной схемой* D_m *конечно, то оно не превосходит* 2^m.

Бесконечное число шарнирников отвечает КШС, если имеется шарнирный механизм с этой кинематической схемой. Например, для схемы рис. 3 он возможен, когда шарниры v_1 и v_5 совместятся, тогда v_2 может вращаться вокруг этих совмещенных шарниров. Если такая возможность отпадает, то строя шарнирник последовательно, присоединением двуповодковой группы Ассура к ранее построенному шарнирнику, каждую новую группу можно присоединить не более чем двумя способами к уже построенному шарнирнику. Поскольку число групп Ассура в разложении равно m, то получаем нашу оценку.

Теорема 2. *Существенная КШС со структурной схемой* D_m *либо устойчива, и в этом случае ей отвечает хотя бы один устойчивый шарнирник, либо неустойчива уже по уменьшению длины одного рычага.*

Рассмотрим какую-либо ветвь дерева $G_1(V,E_1)$ из схемы D_m, пусть $v_1,v_2,...v_k$. По условию можно собрать шарнирник с данной схемой и заданными КШС длинами рычагов. Шарнирник $p_1,p_2,...p_k$ получается последовательным присоединением шарнирников Ассура $A_i, i=2,3,...k$, каждый из которых отвечает соответствующему графу Ассура, к шарнирнику $A_1 = p_1p_{k+1}p_{k+2}$, рис. 4.

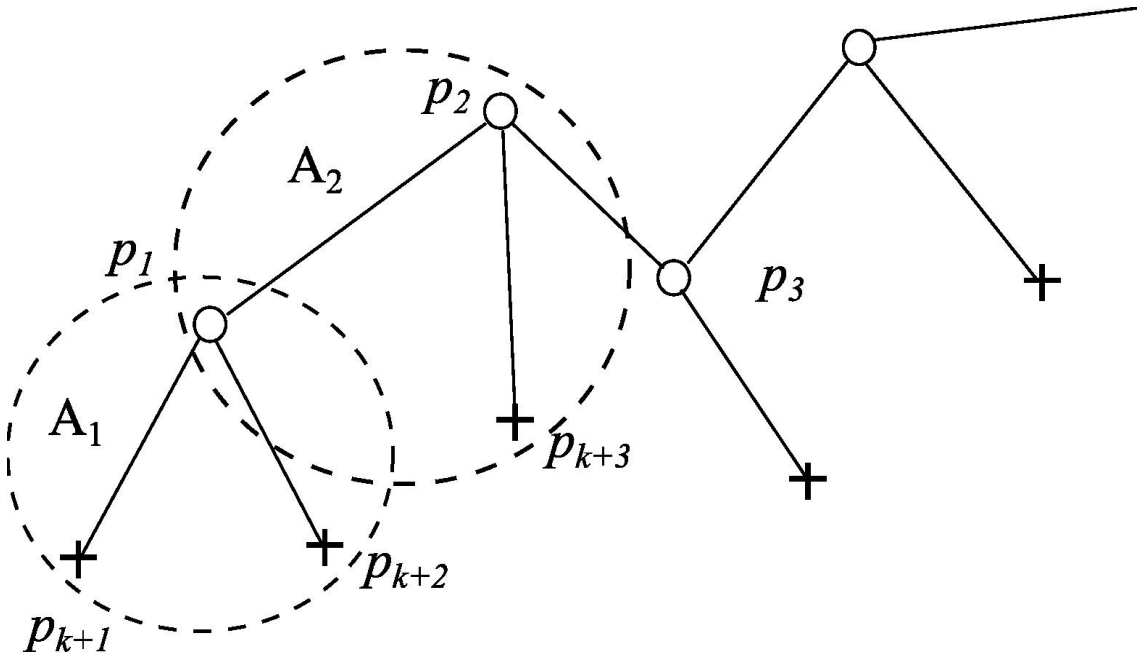


Рис. 4.

Рассмотрим всевозможные, возникающие при последовательной сборке, положения первого свободного шарнира p_1. Возможно два случая:

1. Имеется два различных положения, в этом случае оба шарнирника $p_1^1p_{k+1}p_{k+2}$ и $p_1^2p_{k+1}p_{k+2}$, отвечающих двум возможным сборкам первой группы Ассура и отличающиеся отражением относительно прямой $p_{k+1}p_{k+2}$, устойчивы.

2. Имеется лишь одно положение, в этом случае шарниры $p_1p_{k+1}p_{k+2}$ лежат на одной прямой, и первый шарнирник Ассура неустойчив по уменьшению длины рычагов p_1p_{k+1}, p_1p_{k+2}. Неустойчивым по уменьшению длины рычагов p_1p_{k+1}, p_1p_{k+2} также будет и шарнирник $p_1,p_2,...p_k$ при любых

положениях шарниров $p_2, p_3, \ldots p_k$. То есть, его КШС неустойчива по уменьшению длины первых двух рычагов.

Итак, устойчивость цепи $p_1, p_2, \ldots p_k$ возможна только в первом случае. Продолжим построение присоединяя шарнирник, отвечающий второй группе Ассура A_2, при этом получим, вообще говоря, четыре различных шарнирника $p_1 p_2 p_{k+3}$ с закрепленным шарниром p_{k+3} и шарниром первой группы Ассура в точках p_1^1 или p_1^2, который на этом шаге тоже рассматривается как закрепленный. Если все эти шарнирники неустойчивы, то и вся КШС неустойчива по уменьшению длин рычагов $p_2 p_1, p_2 p_{k+3}$. В противном случае продолжим это построение.

Ясно, что либо на каком-то шаге построения мы получим КШС неустойчивую по уменьшению длин соответствующих рычагов, либо мы дойдем до конца, и шарнирник $p_1, p_2, \ldots p_k$ устойчив. Устойчива и его КШС. Возможность проведения этого рассуждение для каждой ветви дерева D_m доказывает нашу теорему.

В заключение получим один общий результат об однократности и устойчивости КШС, вытекающий из возможности декомпозиции произвольной изостатической схемы на графы Ассура. Пусть ЗШС G представляет собой композицию $G_1 + G_2 + \ldots + G_s$ графов Ассура, и соответствующая существенная КШС **d** задана. Рассмотрим последовательную сборку шарнирника с этой КШС и структурной схемой G. На последнем ее шаге к шарнирнику $\mathbf{p}_{1+2+\ldots+s\text{-}1}$ со схемой $G_1 + G_2 + \ldots + G_{s-1}$ присоединяется шарнирник $\mathbf{p}_s$ Ассура со схемой G_s, часть закрепленных шарниров которой представляют свободные шарниры $q_1, q_2, \ldots q_t$ схемы $G_1 + G_2 + \ldots + G_{s-1}$. Исходная КШС **d**, очевидным образом, для Ассуровской группы G_s порождает КШС $\mathbf{d}_s$, и КШС $\mathbf{d}_{1+2+\ldots+s\text{-}1}$ для схемы $G_1 + G_2 + \ldots + G_{s-1}$.

Теорема 3. *Пусть ЗШС G суть композиция $G_1 + G_2 + \ldots + G_s$ групп Ассура, тогда необходимым условием существования однократной и устойчивой КШС* **d** *со схемой G является однократность и устойчивость КШС* $\mathbf{d}_s$ *с ЗШС G_s.*

Поскольку КШС **d** однократна шарнирник $\mathbf{p}_s$ должен собираться единственным образом при заданных закрепленных шарнирах (в том числе однозначно определенных предыдущей сборкой $q_1, q_2, \ldots q_t$). Заметим, что КШС $\mathbf{d}_{1+2+\ldots+s\text{-}1}$ может быть неоднократна. Тогда при всех остальных сборках шарнирника с этой КШС получаются закрепленные шарниры $q'_1, q'_2, \ldots q'_t$, при которых сборка шарнирника с КШС $\mathbf{d}_s$ невозможна. Шарнирник $\mathbf{p}_s$ устойчив, ибо в противном случае сколь угодно мало изменив

длины его рычагов мы не смогли бы присоединить его к уже построенной конструкции, и таким образом, была бы неустойчива КШС **d**.

Таким образом, вопрос о существовании однократных и устойчивых кинематических шарнирных схем достаточно решить для графов Ассура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев М.Д. О структурных группах Ассура // Теория Механизмов и Машин. № 1 (7) т. 4, 2006, С. 18 – 26.
2. Ковалев М.Д. Геометрическая теория шарнирных устройств // Известия РАН. Серия математическая. 1994. т.58. № 1. С.45–70.
3. Ковалев М.Д. Вопросы геометрии шарнирных устройств и схем // Вестник МГТУ. Серия Машиностроение 2001. № 4. С. 33–51.
4. Ассур Л.В. Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации. Изд. АН СССР, 1952. 589 с.
5. Servatius B., Shai O. and Whiteley W., "Combinatorial Characterization of the Assur Graphs from Engineering", European Journal of Combinatorics, Vol. 31, № 4, May, pp.1091-1104, 2010.
6. Servatius B., Shai O. and Whiteley W., "Geometric Properties of Assur Graphs", European Journal of Combinatorics, Vol. 31, № 4, May, pp. 1105-1120, 2010.
7. Пейсах Э.Е., Нестеров В.А. Системы проектирования плоских рычажных механизмов. М.: Машиностроение. 1988.

УДК 621.01

И.Н. Мацюк, Э.М. Шляхов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И КИНЕТОСТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ МЕХАНИЗМОВ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ



Ирина Николаевна Мацюк, к.т.н., доцент
Государственное высшее учебное заведение “Национальный горный университет”
г. Днепропетровск, Украина.
Тел.: (0562) 47-15-72, E-mail: shlyahove@nmu.org.ua.



Эдуард Михайлович Шляхов, доцент
Государственное высшее учебное заведение “Национальный горный университет”
г. Днепропетровск, Украина.
Тел.: (0562) 47-15-72, E-mail: shlyahove@nmu.org.ua

Аннотация

Изложен аналитический метод определения кинематических и силовых параметров плоских механизмов сложной структуры, базирующийся на использовании математического аппарата векторной алгебры в программе Mathcad. Его применение рассмотрено на конкретном примере механизма пятого класса. Метод позволяет исследовать плоские стержневые механизмы произвольной структуры, включающие в себя кинетостатически определимые кинематические цепи.

Ключевые слова: плоский механизм, механизм пятого класса, кинематика, кинетостатика, векторное уравнение, Mathcad.

I.N. Matsyuk, E.M. Shlyahov

DEFINITION OF KINEMATIC AND KINETOSTATIC PARAMETERS OF FLAT ROD MECHANISMS OF COMPLEX STRUCTURE

Irina N. Matsyuk[1], Phone: (0562) 47-03-16;
Eduard M. Shlyahov[1], Phone: (0562) 47-15-72
[1]State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Karl Marx av., 19, Dnipropetrovsk, 49005, Ukraine

Abstract

The analytical method for the determination of kinematic and force parameters of the planar mechanisms of complex structure based on the application of vector algebra mathematical tools within the Mathcad software framework is suggested. Its application is described on a specific example of the fifth grade mechanism. The method allows investigating the flat rod mechanisms of random structure comprising kinetostaticly definable kinematic chains.

Key words: flat mechanism, the fifth grade, kinematics, kinetostatics, vector equation, Mathcad.

Аналитические методы в настоящее время играют главенствующую роль при анализе и синтезе механизмов. Этому способствует повсеместное проникновение в жизнь человека компьютерных технологий. Классические графические и графоаналитические методы утратили былое значение и используются, в основном, для целей обучения и визуализации результатов исследований. Тем не менее, работы по применению и развитию графоаналитических методов продолжаются [1, 2].

Аналитические методы исследования кинематики механизмов могут базироваться либо на дифференциальных зависимостях между перемещениями, скоростями и ускорениями, как скалярами [3], либо на векторном представлении параметров [4-10].

В основе и графической, и аналитической кинетостатики лежит представление силы, как вектора. Если вектор раскладывается на две составляющие (горизонтальную и вертикальную), то с этими составляющими можно оперировать, как со скалярными величинами [3, 10]. Другой подход заключается в оперировании с собственно векторами [4, 6, 9].

Графоаналитические методы базируются на решении простейших векторных уравнений, которое представляет собой изображение векторных многоугольников на плоскости. Поэтому использование в таких уравнениях, например, векторных произведений векторов не представляется возможным.

С появлением мощных компьютерных математических программ (Mathematica, Maple, Mathcad) задача решения векторных уравнений любой сложности становится тривиальной. В применении к механизмам аппарат векторной алгебры имеет наибольшую эффективность, если звенья механизма представлять соответствующими векторами.

В настоящем докладе изложено исследование кинематики и кинетостатики плоского стержневого механизма относительно сложной структуры. В составе механизма имеется шестизвенная трехповодковая

кинематическая цепь с тремя базисными звеньями (CDE, DFG и HKL), относящаяся по классификации Л.В. Ассура к пятому классу (рис. 1).

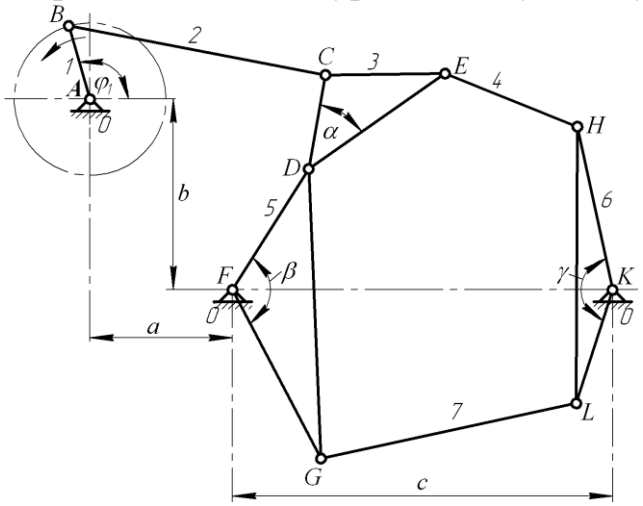


Рис. 1. Схема восьмизвенного механизма пятого класса

Возможности такого подхода покажем на конкретном примере.

Итак, пусть заданы геометрические параметры механизма: $l_{AB}=0{,}16$ м; $l_{BC}=0{,}55$ м; $l_{CD}=0{,}2$ м; $l_{DE}=0{,}35$ м; $l_{EH}=0{,}3$ м; $l_{DF}=0{,}3$ м; $l_{FG}=0{,}4$ м; $l_{HK}=0{,}35$ м; $l_{KL}=0{,}25$ м; $l_{GL}=0{,}55$ м; $\alpha=45^\circ$; $\beta=120^\circ$; $\gamma=150^\circ$.

В качестве обобщенной координаты механизма примем угол поворота входного звена (кривошипа 1): $\varphi_1=120^\circ$.

Векторная интерпретация звеньев механизма изображена на рис. 2, а.

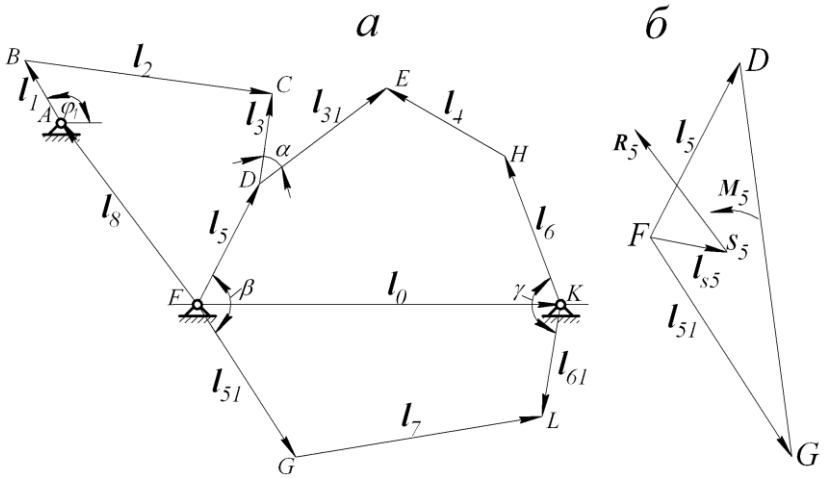


Рис. 2. Векторное представление звеньев механизма:
а – схема механизма; б – схема нагрузок, действующих на звено 5

Исследование выполнено в программе Mathcad -11.

Вводятся исходные данные.

$$l_{AB} := 0.16 \quad l_{BC} := 0.55 \quad l_{CD} := 0.2 \quad l_{DE} := 0.35 \quad l_{EH} := 0.3$$
$$l_{DF} := 0.3 \quad l_{FG} := 0.4 \quad l_{HK} := 0.35 \quad l_{KL} := 0.25 \quad l_{GL} := 0.55$$
$$a := 0.3 \quad b := 0.4 \quad c := 0.8$$
$$\alpha := \frac{\pi}{4} \quad \beta := \frac{2\pi}{3} \quad \gamma := \frac{5\pi}{6} \quad \phi_1 := \frac{2\pi}{3}$$

Здесь и далее вставки фрагментов документов Mathcad отличаются размером шрифта. Обозначим длины звеньев следующим образом.

$$l_1 := l_{AB} \quad l_2 := l_{BC} \quad l_3 := l_{CD} \quad l_{31} := l_{DE} \quad l_4 := l_{EH}$$
$$l_5 := l_{DF} \quad l_{51} := l_{FG} \quad l_6 := l_{HK} \quad l_{61} := l_{KL} \quad l_7 := l_{GL}$$

Вначале выполняется геометрический анализ механизма с целью определения положения звеньев. Положение звена задается углом, который соответствующий вектор имеет с положительной осью абсцисс. Для нахождения шести углов составляют уравнения замкнутости трех векторных контуров, поскольку угол есть величина скалярная, а из одного векторного уравнения можно найти две скалярные неизвестные. Решение этой системы трех векторных уравнений производится с помощью решающего блока Given – Find. Для компактности запись векторов в программе Mathcad производится в транспонированном виде. Ниже приведен фрагмент документа Mathcad, в котором выполнено решение указанной системы уравнений.

$$\phi_2 := 1 \quad \phi_3 := 1 \quad \phi_4 := 1 \quad \phi_5 := 1 \quad \phi_6 := 1 \quad \phi_7 := 1$$

Given

$$\begin{pmatrix} -a \\ b \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 \cdot \cos(\phi_1) \\ l_1 \cdot \sin(\phi_1) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_2 \cdot \cos(\phi_2) \\ l_2 \cdot \sin(\phi_2) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_5 \cdot \cos(\phi_5) \\ l_5 \cdot \sin(\phi_5) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_3 \cdot \cos(\phi_3) \\ l_3 \cdot \sin(\phi_3) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} l_5 \cdot \cos(\phi_5) \\ l_5 \cdot \sin(\phi_5) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_{31} \cdot \cos(\phi_3 - \alpha) \\ l_{31} \cdot \sin(\phi_3 - \alpha) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_6 \cdot \cos(\phi_6) \\ l_6 \cdot \sin(\phi_6) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_4 \cdot \cos(\phi_4) \\ l_4 \cdot \sin(\phi_4) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} l_{51}\cdot\cos(\phi_5-\beta) \\ l_{51}\cdot\sin(\phi_5-\beta) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_7\cdot\cos(\phi_7) \\ l_7\cdot\sin(\phi_7) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_{61}\cdot\cos(\phi_6+\gamma) \\ l_{61}\cdot\sin(\phi_6+\gamma) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 \\ \phi_5 & \phi_6 & \phi_7 \end{pmatrix} := \text{Find}\begin{pmatrix} \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 \\ \phi_5 & \phi_6 & \phi_7 \end{pmatrix}$$

$\phi_2 = -0.134$ $\phi_3 = 1.431$ $\phi_4 = 2.619$ $\phi_5 = 1.096$

$\phi_6 = 1.931$ $\phi_7 = 0.164$

.

Найденные решения в радианах можно выразить в градусах.

$\phi_2 = -7.7\text{deg}$ $\phi_3 = 81.98\text{deg}$ $\phi_4 = 150.04\text{deg}$

$\phi_5 = 62.8\text{deg}$ $\phi_6 = 110.64\text{deg}$ $\phi_7 = 9.37\text{deg}$

.

В соответствии с рисунком 2, *а* векторы представляются следующим образом.

$$l_1 := \begin{pmatrix} l_1\cdot\cos(\phi_1) \\ l_1\cdot\sin(\phi_1) \\ 0 \end{pmatrix} \quad l_2 := \begin{pmatrix} l_2\cdot\cos(\phi_2) \\ l_2\cdot\sin(\phi_2) \\ 0 \end{pmatrix} \quad l_3 := \begin{pmatrix} l_3\cdot\cos(\phi_3) \\ l_3\cdot\sin(\phi_3) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$l_{31} := \begin{pmatrix} l_{31}\cdot\cos(\phi_3-\alpha) \\ l_{31}\cdot\sin(\phi_3-\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} \quad l_4 := \begin{pmatrix} l_4\cdot\cos(\phi_4) \\ l_4\cdot\sin(\phi_4) \\ 0 \end{pmatrix} \quad l_5 := \begin{pmatrix} l_5\cdot\cos(\phi_5) \\ l_5\cdot\sin(\phi_5) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$l_{51} := \begin{pmatrix} l_{51}\cdot\cos(\phi_5-\beta) \\ l_{51}\cdot\sin(\phi_5-\beta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad l_6 := \begin{pmatrix} l_6\cdot\cos(\phi_6) \\ l_6\cdot\sin(\phi_6) \\ 0 \end{pmatrix} \quad l_{61} := \begin{pmatrix} l_{61}\cdot\cos(\phi_6+\gamma) \\ l_{61}\cdot\sin(\phi_6+\gamma) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$l_7 := \begin{pmatrix} l_7\cdot\cos(\phi_7) \\ l_7\cdot\sin(\phi_7) \\ 0 \end{pmatrix} \quad l_0 := \begin{pmatrix} c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad l_8 := \begin{pmatrix} -a \\ b \\ 0 \end{pmatrix}$$

.

Пусть угловая скорость кривошипа 1 будет равна (в c^{-1})

$$\omega_1 := (0 \;\; 0 \;\; 10)^T$$

.

На следующем этапе определяют угловые скорости звеньев так, как они являются свободными векторами и, следовательно, для нахождения шести неизвестных понадобится также три уравнения. Эти уравнения записывают для тех же контуров (*ABCDFA*, *FDEHKE* и *FKLGF*), для

которых были составлены уравнения замкнутости. Ниже приведен соответствующий фрагмент документа Mathcad.

$$\omega_2 := (0\ \ 0\ \ 10)^T \qquad \omega_3 := (0\ \ 0\ \ 10)^T \qquad \omega_4 := (0\ \ 0\ \ 10)^T$$

$$\omega_5 := (0\ \ 0\ \ 10)^T \qquad \omega_6 := (0\ \ 0\ \ 10)^T \qquad \omega_7 := (0\ \ 0\ \ 10)^T$$

Given

$$\omega_1 \times l_1 + \omega_2 \times l_2 = \omega_5 \times l_5 + \omega_3 \times l_3$$

$$\omega_5 \times l_5 + \omega_3 \times l_{31} = \omega_6 \times l_6 + \omega_4 \times l_4$$

$$\omega_5 \times l_{51} + \omega_7 \times l_7 = \omega_6 \times l_{61}$$

$$\begin{pmatrix} \omega_2 & \omega_3 & \omega_4 \\ \omega_5 & \omega_6 & \omega_7 \end{pmatrix} := \text{Find}\begin{pmatrix} \omega_2 & \omega_3 & \omega_4 \\ \omega_5 & \omega_6 & \omega_7 \end{pmatrix}$$

$$\omega_2^T = (0\ \ 0\ \ 2.52) \qquad \omega_3^T = (0\ \ 0\ \ 0.57) \qquad \omega_4^T = (0\ \ 0\ \ -5.76)$$

$$\omega_5^T = (0\ \ 0\ \ 4.08) \qquad \omega_6^T = (0\ \ 0\ \ 6.32) \qquad \omega_7^T = (0\ \ 0\ \ -2.1)$$

.

На этапе определения ускорений находят угловые ускорения звеньев (в $с^{-2}$), для чего необходима также система трех уравнений, составленных для трех контуров.

$$\varepsilon_2 := (0\ \ 0\ \ 10)^T \qquad \varepsilon_3 := (0\ \ 0\ \ 10)^T \qquad \varepsilon_4 := (0\ \ 0\ \ 10)^T$$

$$\varepsilon_5 := (0\ \ 0\ \ 10)^T \qquad \varepsilon_6 := (0\ \ 0\ \ 10)^T \qquad \varepsilon_7 := (0\ \ 0\ \ 10)^T$$

Given

$$\omega_1 \times \left(\omega_1 \times l_1\right) + \omega_2 \times \left(\omega_2 \times l_2\right) + \varepsilon_2 \times l_2 - \omega_5 \times \left(\omega_5 \times l_5\right) - \varepsilon_5 \times l_5 \ldots = 0$$
$$+\left(-\omega_3 \times \omega_3 \times l_3 - \varepsilon_3 \times l_3\right)$$

$$\omega_5 \times \left(\omega_5 \times l_5\right) + \varepsilon_5 \times l_5 + \omega_3 \times \left(\omega_3 \times l_{31}\right) + \varepsilon_3 \times l_{31} \ldots$$
$$+\left[-\omega_6 \times \left(\omega_6 \times l_6\right) - \varepsilon_6 \times l_6 - \omega_4 \times \left(\omega_4 \times l_4\right) - \varepsilon_4 \times l_4\right]$$
$$\omega_5 \times \left(\omega_5 \times l_{51}\right) + \varepsilon_5 \times l_{51} + \omega_7 \times \left(\omega_7 \times l_7\right) \ldots = 0$$
$$+\varepsilon_7 \times l_7 - \omega_6 \times \omega_6 \times l_{61} - \varepsilon_6 \times l_{61}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_2 & \varepsilon_3 & \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 & \varepsilon_6 & \varepsilon_7 \end{pmatrix} := \text{Find}\begin{pmatrix} \varepsilon_2 & \varepsilon_3 & \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 & \varepsilon_6 & \varepsilon_7 \end{pmatrix}$$

.

$$\varepsilon_2^T = (0\ \ 0\ \ 14.4) \qquad \varepsilon_3^T = (0\ \ 0\ \ -39.7) \qquad \varepsilon_4^T = (0\ \ 0\ \ 0)$$

$$\varepsilon_5^T = (0\ \ 0\ \ 0) \qquad \varepsilon_6^T = (0\ \ 0\ \ -21.4) \qquad \varepsilon_7^T = (0\ \ 0\ \ -7.96)$$

.

Располагая полученными данными, легко определить линейные скорость и ускорение любой точки механизма. Например, для точки *E*:

$$v_E := \omega_5 \times l_5 + \omega_3 \times l_{31} \qquad v_E^T = (-1.21 \quad 0.72 \quad 0)$$

$$a_E := \omega_5 \times (\omega_5 \times l_5) + \varepsilon_5 \times l_5 \qquad a_E^T = (-2.28 \quad -4.43 \quad 0)$$

.

При выполнении кинетостатического анализа для упрощения будем считать:

- все силы, действующие на звено i, включая и инерционные, представляются равнодействующим вектором $\boldsymbol{R}_i$, приложенном в центре масс звена s_i;
- все моменты сил, включая и инерционные, представляются равнодействующим вектором $\boldsymbol{M}_i$;
- реакция звена j на звено i обозначается $\boldsymbol{R}_{ji}$;
- нагрузки приложены только к базисным звеньям;
- центры масс базисных звеньев лежат в точках пересечения медиан;
- массы остальных звеньев пренебрежимо малы.

Как выглядит, например, схема нагрузок на звено 5, изображено на рис. 2, *б*.

Векторы, определяющие положения центров масс

$$l_{s3} := \frac{l_3 + l_{31}}{3} \qquad l_{s3}^T = (0.102 \quad 0.136 \quad 0) \qquad l_{s5} := \frac{l_5 + l_{51}}{3} \qquad l_{s5}^T = (0.118 \quad -0.023 \quad 0)$$

$$l_{s6} := \frac{l_6 + l_{61}}{3} \qquad l_{s6}^T = (-0.055 \quad 0.027 \quad 0)$$

В качестве нагрузок примем следующие значения (R – Н, M – Нм).

$$R_3 := (200 \quad -300 \quad 0)^T \qquad M_3 := (0 \quad 0 \quad 60)^T$$

$$R_5 := (-300 \quad 400 \quad 0)^T \qquad M_5 := (0 \quad 0 \quad -40)^T$$

$$R_6 := (-250 \quad -150 \quad 0)^T \qquad M_6 := (0 \quad 0 \quad -110)^T$$

.

Для определения девяти реакций в кинематических парах данной структурной группы записывают систему из двенадцати векторных уравнений: по два для каждого из звеньев группы. Одно уравнение в виде равенства нулю суммы всех сил, действующих на звено. Второе – в виде равенства нулю суммы моментов этих сил относительно какого-либо центра. Соответствующий фрагмент представлен ниже.

$$R_{12} := (100 \quad 100 \quad 0)^T \qquad R_{23} := (100 \quad 100 \quad 0)^T \qquad R_{34} := (100 \quad 100 \quad 0)^T$$

$$R_{35} := (100 \quad 100 \quad 0)^T \qquad R_{46} := (100 \quad 100 \quad 0)^T \qquad R_{05} := (100 \quad 100 \quad 0)^T$$

$$R_{57} := (100 \quad 100 \quad 0)^T \qquad R_{67} := (100 \quad 100 \quad 0)^T \qquad R_{06} := (100 \quad 100 \quad 0)^T$$

Given

$$R_{12} - R_{23} = 0 \qquad l_2 \times \left(-R_{23}\right) = 0$$

$$R_{23} - R_{34} - R_{35} + R_3 = 0 \qquad l_3 \times R_{23} - l_{31} \times R_{34} + l_{s3} \times R_3 + M_3 = 0$$

$$R_{35} - R_{67} + R_{05} + R_5 = 0 \qquad l_5 \times R_{35} - l_{51} \times R_{67} + l_{s5} \times R_5 + M_5 = 0$$

$$R_{34} - R_{46} = 0 \qquad l_4 \times R_{34} = 0$$

$$R_{57} + R_{67} = 0 \qquad l_7 \times R_{67} = 0$$

$$R_{46} - R_{67} + R_{06} + R_6 = 0 \qquad l_6 \times R_{46} - l_{61} \times R_{67} + l_{s6} \times R_6 + M_6 = 0$$

$$\begin{pmatrix} R_{12} & R_{23} & R_{34} \\ R_{35} & R_{46} & R_{05} \\ R_{57} & R_{67} & R_{06} \end{pmatrix} := \text{Find}\begin{pmatrix} R_{12} & R_{23} & R_{34} \\ R_{35} & R_{46} & R_{05} \\ R_{57} & R_{67} & R_{06} \end{pmatrix}$$

$$R_{12}^{T} = (-414.9 \quad 56.1 \quad 0) \qquad R_{23}^{T} = (-414.9 \quad 56.1 \quad 0)$$

$$R_{34}^{T} = (-230.7 \quad 133 \quad 0) \qquad R_{35}^{T} = (15.8 \quad -376.9 \quad 0)$$

$$R_{46}^{T} = (-230.7 \quad 133 \quad 0) \qquad R_{05}^{T} = (134.6 \quad -47.8 \quad 0)$$

$$R_{57}^{T} = (149.6 \quad 24.7 \quad 0) \qquad R_{67}^{T} = (-149.6 \quad -24.7 \quad 0)$$

$$R_{06}^{T} = (331.1 \quad -7.7 \quad 0)$$

.

В заключение находят реакцию в шарнире *A* и вектор уравновешивающего момента (*R* – Н, *M* – Нм).

$$R_{21} := -R_{12} \qquad R_{01} := -R_{21} \qquad R_{01}^{T} = (-414.9 \quad 56.1 \quad 0)$$

$$M_{\text{óð}} := l_1 \times R_{21} \qquad M_{\text{óð}}^{T} = (0 \quad 0 \quad -53)$$

.

Таким образом, описанный алгоритм позволяет:

- исследовать механизмы сложной структуры, которые относят к высоким классам;
- минимизировать объем программы для определения кинематических и кинетостатических параметров механизма;
- получать результаты в естественном для определяемых параметров виде, т.е. векторном;
- выполнять исследование не по структурным группам, а механизма в целом.

Изменяя значения обобщенной координаты от 0 до 2π, получают полную картину изменения параметров кинематики и кинетостатики за один цикл установившегося движения механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлебосолов И.О. Графоаналитические методы расчета механизмов с использованием ЭВМ. // Теория механизмов и машин. 2004. Т. 2. №2(4). С. 40-44.
2. Дворников Л.Т., Стариков С.П. Кинематика и кинетостатика плоской шестизвенной группы Ассура четвертого класса. // Теория механизмов и машин. 2006. Т.4. № 1(7). С. 61–65.
3. Дослідження важільних механізмів з допомогою ПЕОМ: Навч. посібник / Ф.Й. Златопольський, Г.Б. Філімоніхін, В.В. Коваленко, О.Б. Чайковський. – Кіровоград: ПП”КОД”,1999. – 107 с.
4. Мацюк І.М. Дослідження кінематики та динаміки механізмів засобами векторної алгебри. // ВІСНИК Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Серія “Гірництво”: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ “КПІ”: ЗАТ “Техновибух”, 2009. – Вип. 18. – с. 79-84.
5. Мацюк И.Н., Третьяков В.М., Шляхов Э.М. Кинематический анализ плоских рычажных механизмов высоких классов в программе Mathcad. // Теория механизмов и машин. 2012. Т. 10. № 1(19). С.65-70.
6. Кінематичне та динамічне дослідження плоских важільних механізмів [Текст]: навч. посібник / І.М. Мацюк, Е.М. Шляхов, К.А. Зіборов. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – 132 с.
7. Третьяков В.М. Использование программы Mathcad при определении скоростей и ускорений рычажных механизмов. // Теория механизмов и машин. 2009. Т.7. № 2(14). С. 40-48.
8. Зиборов К.А., Мацюк И.Н., Шляхов Э.М. Преподавание теории механизмов и машин с использованием компьютерных технологий. // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Международной научно-практической конференции. / Под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 53 – 65.
9. Зиборов К.А., Мацюк И.Н., Шляхов Э.М., Силовой анализ механизмов с помощью программы Mathcad. // Теория механизмов и машин. 2010. Т.8. № 1(15). С. 83-88.
10. Бертяев В.Д. Теоретическая механика на базе Mathcad. Практикум. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.: ил.

УДК 531.23

А.В. Нестеров, С.В. Нестеров, А.В. Михайлов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА



Нестеров Александр Владимирович, к.т.н., доцент
Кубанский государственный технологический университет,
ул. Московская, д. 2, Краснодар, 350072, Россия.
Тел. 8 (861) 267-98-59, E-mail: briefkasten129@rambler.ru



Нестеров Сергей Владимирович, к.т.н., доцент
Кубанский государственный технологический университет,
ул. Московская, д. 2, Краснодар, 350072, Россия.
Тел. 8 (861) 255-66-44, E-mail: nesterov@kubstu.ru



Михайлов Арсений Васильевич, студент
Кубанский государственный технологический университет,
ул. Московская, д. 2, Краснодар, 350072, Россия.
Тел. 8 (961) 850-21-50, E-mail: arsniy-mihaiylov@bk.ru

Аннотация

Рассматривается один из вариантов технической реализации метода свободного выбега электропривода постоянного тока.

Ключевые слова: электропривод, постоянная времени, регрессионный анализ.

A.V. Nesterov, S.V. Nesterov, A.V. Mihaiylov

DETERMINATION OF A TIME CONSTANT OF THE MECHANICAL PART OF AN ELECTRIC DRIVE

Dr. A.V. Nesterov[1], e-mail: briefkasten129@rambler.ru;
Dr. S.V. Nesterov[1], e-mail: nesterov@kubstu.ru;
A.V. Mihaiylov[1], e-mail: arsniy-mihaiylov@bk.ru.
[1]Kuban State Technological University, Russia

Abstract

A variant of technical implementation of the running-out method of a d.c. drive is considered.

Key words: electric drive, time constant, regression analysis.

В докладе рассматривается один из вариантов технической реализации метода свободного выбега (самоторможения) электродвигателя постоянного тока (ДПТ).

От стандартного (классического) [1-3] он отличается способом получения динамической характеристики $\omega(t)$. Предлагается в качестве датчика угловой скорости якоря $\omega(t)$ использовать сам ДПТ, механическая постоянная времени T которого является искомой. Оценка эффективности названного метода при сравнении его со стандартным составляет цель данной работы.

Любая модификация метода свободного выбега базируется на гипотезе линейности механической характеристики

$$M_{\text{с}} = \beta\omega(t). \qquad (1)$$

В этом случае свободное движение якоря ДПТ описывают дифференциальным уравнением [1, 3]

$$J\frac{d\omega}{dt} + \beta\omega(t) = 0$$

или

$$T\frac{d\omega}{dt} + \omega(t) = 0, \qquad (2)$$

где J – момент инерции якоря ДПТ (суммарный момент инерции электропривода); β – жесткость механической характеристики $M_{\text{с}}(\omega)$; $T = J/\beta$ – постоянная времени механической части ДПТ.

Решением уравнения (2) является экспоненциальная функция времени

$$\omega(t) = \omega_0 e^{-t/T}, \qquad (3)$$

где ω_0 – скорость холостого хода ДПТ в данном случае.

График этой функции изображен на рис. 1.

Одним из ее свойств является то, что длина подкасательной к экспоненте в масштабе времени всегда равна T. Это обусловливает порядок экспериментального определения постоянной времени T в три этапа. Во-первых, проводят собственно эксперимент, в результате которого получают динамическую характеристику $\omega_{\text{дв}}(t)$. Во-вторых, анализируют ее график, сравнивая его по внешнему виду с идеальной экспонентой $\omega(t)$ (рис.1). В-третьих, если график $\omega_{\text{дв}}(t)$ не имеет существенных отличий от идеального $\omega(t)$ и, следовательно, гипотеза линейности $M_{\text{с}}(\omega)$ может быть принята, способом касательной определяют постоянную времени T.

Недостатки рассматриваемого метода хорошо известны. Каждый из названных этапов может быть усовершенствован, что в конечном итоге повысит эффективность метода в целом.

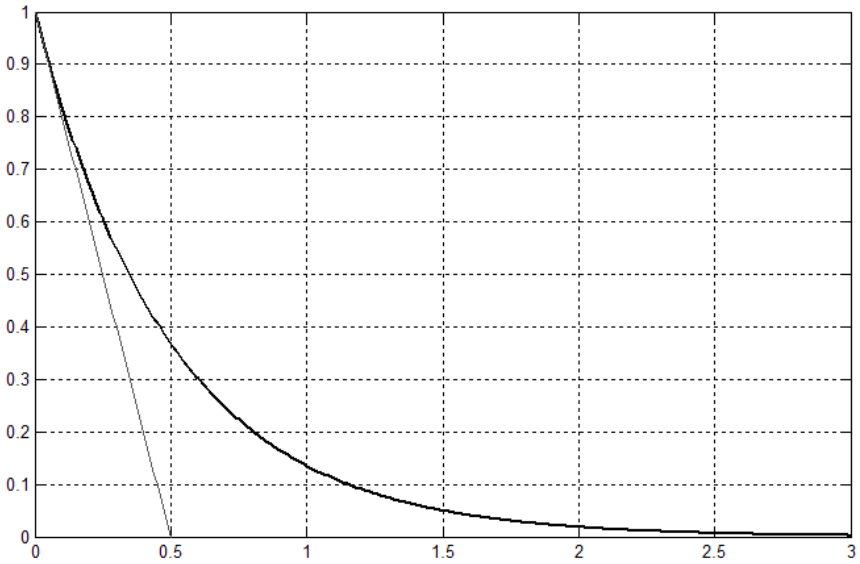


Рис. 1. Экспонента

В первую очередь предлагается упростить измерительную схему, исключив из нее датчик угловой скорости, а его функцию возложить на испытуемый ДПТ. Согласно принципу обратимости электрических машин ДПТ при неизменном возбуждении ($\Phi = \text{const}$) с началом свободного выбега переходит в генераторный режим. В обмотке якоря наводится ЭДС

$$e_{\text{дв}}(t) = C_e \Phi \omega_{\text{дв}}(t),$$

которая зависит только от угловой скорости якоря $\omega_{\text{дв}}(t)$. Другими словами, в рассматриваемом режиме ДПТ "превращается" в тахогенератор.

Заметим также, что испытывался ДПТ типа СЛ-569М. Сбор и первичная обработка измерительной информации произведены посредством цифрового осциллографа DSO 1014. На рис. 2 представлены основные результаты эксперимента, отображенные на экране последнего.

Верхний график изображает изменение ЭДС двигателя $e_{\text{дв}}(t)$ при свободном выбеге якоря, нижний – ЭДС тахогенератора $e_{\text{тг}}(t)$, который используется в качестве образцового средства измерения угловой скорости якоря ДПТ. Сравнение названных графиков свидетельствует об отсутствии каких-либо заметных отличий между ними. Кроме того, по своему внешнему виду они сходны с экспонентой (рис. 1). Поэтому по первому графику $e_{\text{дв}}(t)$ можно определить искомую постоянную времени T классическим методом касательной, а второй $e_{\text{тг}}(t)$ этим же самым способом использовать для проверки. Однако, в рассматриваемом случае погрешность результата велика. Чтобы уменьшить ее, необходимо заменить графический способ определения постоянной времени T аналитическим. В этом отношении хорошо зарекомендовал себя регрессионный анализ [5-8]. Он позволяет построить нелинейную регрессионную модель типа (3)

$$e_{\text{дв}}(t) = e_0 \cdot e^{-t/T} \qquad (4)$$

и дать объективную оценку ее адекватности. Вся процедура легко автоматизируется в любой из известных систем компьютерной математики. Некоторое преимущество перед другими имеет MATLAB 7.0 с его пакетами расширения Statistics Toolbox 5.0, System Identification Toolbox 6.0 и Curve Fitting Toolbox 1.1.1 [10]. Ниже приводятся результаты исследования регрессионной модели (4), полученные с помощью инструментария пакета, названного первым.

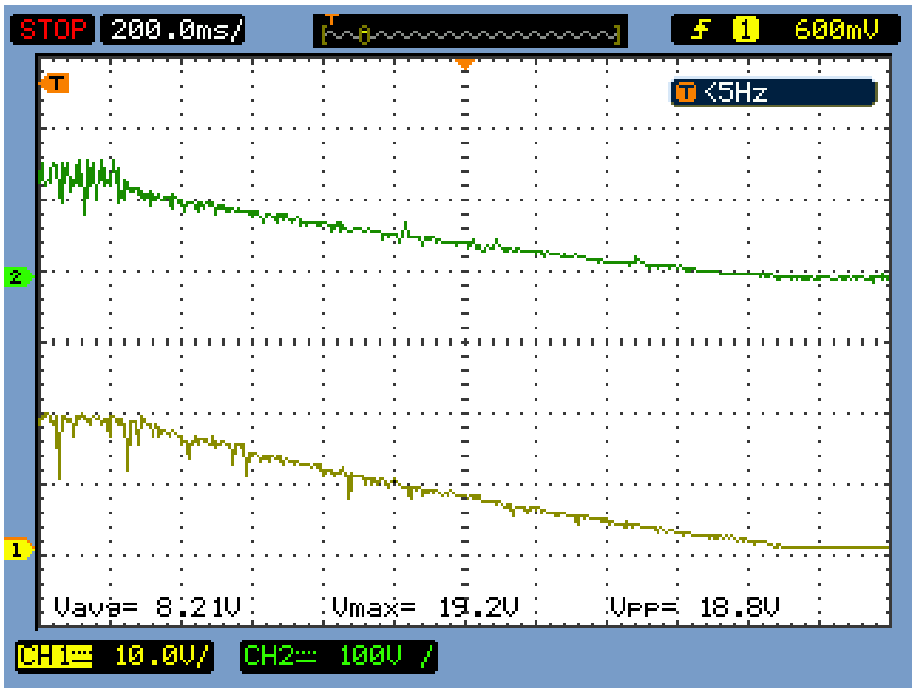


Рис. 2. Осциллограммы

Для этого оцифрованные процессором осциллографа сигналы (выборки) $e_{\text{дв}}(t)$ и $e_{\text{тг}}(t)$ импортированы в MATLAB. Построение нелинейных регрессионных моделей поддерживает группа функций пакета расширения Statistics Toolbox, одна из которых *nlintool* делает это в интерактивном режиме с визуализацией результата, показанного на рис. 3.

На экран выведены выборка $e_{\text{дв}}(t)$ в виде "облака" точек, линия экспоненциальной регрессии $e_{\text{э}}(t)$ и границы доверительного интервала. Кроме того, возвращены параметры модели (4) $e_0 = 88{,}6092$ В, искомая постоянная времени $T = 1{,}1713$ с и некоторые статистики.

Важным вопросом считается проверка параметров и качества построенной регрессионной модели

$$e_{\text{э}}(t) = 88{,}61e^{-t/1{,}17}, \qquad (5)$$

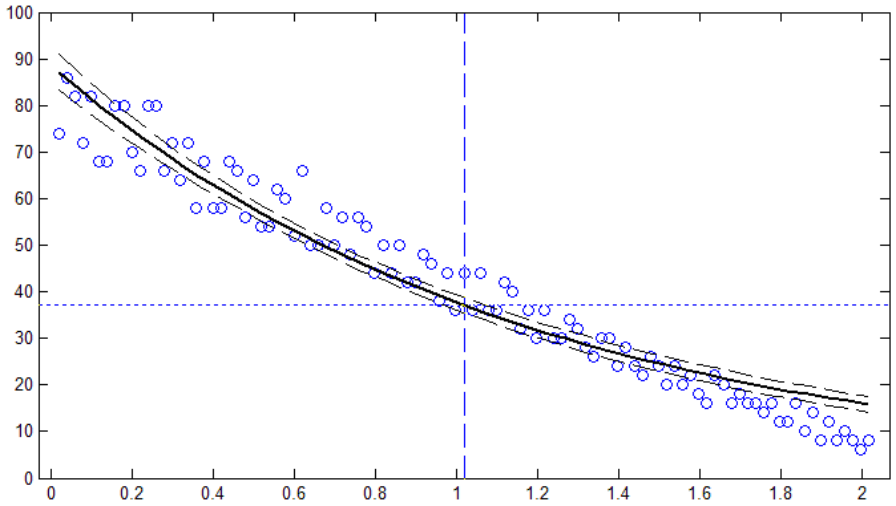


Рис. 3. Экспоненциальная модель

включающая в себя задачи исследования остатков и оценки адекватности модели [4]. Относительно первой кратко отметим, что остатки распределены нормально и взаимно независимы. Вторую задачу выделим особо в связи с гипотезой линейности механической характеристики (1). Традиционное понимание адекватности модели (5) позволяет обоснованно принять или отклонить названную гипотезу. Иначе говоря, статистическая оценка адекватности модели одновременно является объективной математической оценкой справедливости зависимости (1). В итоге, построенная экспоненциальная модель (5) характеризуется статистикой

$$\hat{F}_{\text{э}} = \frac{\bar{S}^2}{\bar{S}^2_{\text{ост}}} = \frac{481{,}8519}{31{,}5269} = 15{,}2838,$$

где $\bar{S}^2$ – общая дисперсия; $\bar{S}^2_{\text{ост}}$ – остаточная дисперсия.

Критическое значение F-критерия Фишера для исследуемой выборки $e(t)$ объемом $n = 101$ равно $F^T = 1{,}3931$. Таким образом, $\hat{F}_{\text{э}} > F^T$, следовательно, уравнение экспоненциальной регрессии (5) верно описывает результаты эксперимента на уровне значимости $\alpha = 0{,}05$. Кроме того, нет достаточных оснований для отклонения гипотезы линейности механической характеристики $M_{\text{с}}(\omega)$. Более того, дополнительное исследование экспоненциальной модели показывает, что она является наилучшей из типовых [4]. Из этого ряда по внешнему виду к экспоненте (рис. 1) близка гипербола. На основании такого сходства эмпирическую экспоненциальную зависимость иногда аппроксимируют гиперболой, если последняя модель характеризуется меньшей остаточной дисперсией. Расчет показал противоположное, то есть построенная экспоненциальная модель точнее гиперболической. В этом смысле она и названа выше наилучшей.

Наконец, для последней проверки предлагаемой модификации метода свободного выбега проведен регрессионный анализ ЭДС тахогенератора

$e_{\text{г}}(t)$, в результате которого установлено, что искомая постоянная времени $T = 1{,}20$ с. Разница между двумя значениями *T*, полученными модифицированным и классическим методами, не превышает 10 %. Чтобы выяснить, насколько значима в статистическом смысле названная разница, то есть определить погрешность измерения постоянной времени *T*, необходима серия экспериментов, которая будет осуществлена позже.

Таким образом, поставленная в начале доклада цель достигнута. Экспериментально засвидетельствована работоспособность модифицированного метода свободного выбега. Показано, что упрощение измерительной схемы не ухудшает ее метрологических характеристик. При этом облегчается подготовка и проведение эксперимента, не требующего установки тахогенератора. Кроме того, разработано математическое обеспечение обработки экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

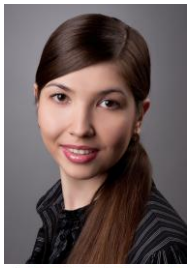
1. Борцов Д.А., Суворов Г.В., Шестаков Ю.С. Экспериментальное определение параметров автоматизированных электроприводов. – М.: Энергия, 1969. – 102 с.
2. СТ СЭВ 295-76 Машины электрические вращающиеся. Методы определения момента инерции вращающейся части.
3. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, СПб отделение, 1994. – 496 с.
4. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высш. шк.,1988. – 239 с.
5. Нестеров С.В., Нестеров А.В. Расчет электромагнитной и электромеханической постоянных времени электропривода постоянного тока по кривой его разгона в среде MathCAD // Электромеханические преобразователи энергии: Труды 3-ей межвузов. науч. конф. – Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2004. – С. 130-132.
6. Нестеров С.В., Нестеров А.В. Идентификация механической части жесткого электропривода с моментом нагрузки типа вязкого трения // Электромеханические преобразователи энергии: Труды 4-ой межвузов. науч. конф.- Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2005. – С. 69-71.
7. Нестеров А.В., Нестеров С.В. Оценка параметров объектов управления при их идентификации // Электромеханические преобразователи энергии: Труды 4-ой межвузов. науч. конф. – Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2005. – С. 71-72.
8. Нестеров С.В., Нестеров А.В. Определение момента инерции электропривода постоянного тока по экспериментальным данным в среде MathCAD // Материалы V Всероссийской науч. конф. "ВРНК–07". Сборник материалов. Т. 2. – Краснодар: КВВАУЛ, 2007. – С. 7-8.

9. Нестеров А.В., Нестеров С.В. Теория автоматического управления. – Краснодар: Изд-во ГОУВПО "КубГТУ", 2006. – 191 с.
10. Нестеров А.В., Нестеров С.В. Об информационном аспекте применения системы MATLAB для расчета типовых статистик // Информатика: проблемы, методология, технологии: Материалы XIII Междунар. науч.-метод. конф. Т. 2. – Воронеж: ИПЦ Воронеж. гос. ун-та, 2013. – С. 427-430.

УДК62-185.6

Ф.Р. Нигматуллина, В.А. Терешин

РЕЖИМ РАЗГОНА ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА ТЕЛЕСКОПА



Фарида Расимовна Нигматуллина, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (911)980-3795, E-mail: farida_17@mail.ru



Валерий Алексеевич Терешин, доцент, к.т.н.,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812)297-4845, E-mail: terva@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена оценке влияния параметров двигателей на переходные процессы в опорно-поворотном устройстве.

Ключевые слова: режим разгона телескопа, влияние параметров двигателей на переходные процессы.

MODE OF DISPERSAL OF THE BASIC AND ROTARY DEVICE OF THE TELESCOPE

Farida R. Nigmatullina[1], e-mail: farida_17@mail.ru;
Valery A. Tereshin[1], e-mail: terva@mail.ru.
[1]St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Work is devoted to an assessment of influence of parameters of engines on transients in the basic and rotary device (BRD). Movement BRD of a telescope is defined by properties of mechanical part, engines and a control system [10]. For creation of the most perfect design of OPU as control systems it is necessary to estimate influence of many parameters on its movement. For the purpose of an assessment of influence on movement of not ideality of engines in this work the system of programmed control without feedback is investigated. This research allows to define the greatest possible speed at restrictions on manage-

ment. In a basis of research the equation of the BRD movement which has been worked out taking in to account of a small influence on its solution of a number of parameters is necessary

Key words: mode of dispersal of the telescope, influence of parameters of engines on transients.

Работа посвящена оценке влияния параметров двигателей на переходные процессы в опорно-поворотном устройстве (ОПУ). Движение ОПУ телескопа определяется свойствами механической части, двигателями и системой управления [10]. Для создания наиболее совершенной конструкции ОПУ как системы управления необходимо оценивать влияние многих параметров на ее движение. С целью оценки влияния на движение неидеальности двигателей в данной работе исследуется система программного управления без обратных связей. Данное исследование позволяет определить максимально возможное быстродействие при ограничениях на управление. В основу исследования положено уравнение движения ОПУ, составленное с учетом малости влияния на его решение ряда параметров.

Уравнения движения ОПУ получены методом уравнений Лагранжа второго рода.

$$Q_j = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_j}, \quad j = 1,2,3, \tag{1}$$

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_{дв1} + T_{дв2} + T_{дв3},$$

где T – кинетическая энергия системы [7]. Учет кинетической энергии подвижных звеньев редукторов, как правило, не повышает точности расчетов, так как быстроходные звенья имеют и скорости, и моменты инерции несколько меньшие, чем у роторов двигателей, а тихоходные – гораздо легче функциональных звеньев. Поэтому кинетическая энергия системы может быть записана как сумма кинетических энергий трех функциональных звеньев T_j и трех роторов двигателей $T_{двj}$; q_j – углы относительных поворотов функциональных звеньев; Q_j – обобщенные силы, приведены к q_j, порожденные силами тяжести звеньев, трением и движущими моментами, приложенными к роторам двигателей. Кинетическая энергия быстро вращающихся роторов двигателей с достаточной точностью может быть записана следующим образом:

$$T_{двj} = \frac{1}{2} \cdot J_{pj} \cdot i_j^2 \cdot \dot{q}_j^2,$$

где J_{pj} – осевой момент инерции ротора двигателя j; i_j – передаточное отношение редуктора j, $j = 1,2,3$.

$$J_{p1} = 0{,}014 кг \cdot м^2;\ J_{p2} = 0{,}014 кг \cdot м^2;\ J_{p3} = 0{,}014 кг \cdot м^2;$$
$$i_1 = 721{,}3;\ i_2 = 723{,}8;\ i_3 = 724{,}0;$$
$$J_{p1} \cdot i_1^2 = 7280 кг \cdot м^2;\ J_{p2} \cdot i_2^2 = 7340 кг \cdot м^2;\ J_{p3} \cdot i_3^2 = 7340 кг \cdot м^2.$$

Так как $T = T(\dot{q}, q)$, где q – столбец трех обобщенных координат, то уравнение (1) можно преобразовать к матричному виду [5], [4]

$$Q = \frac{\partial^2 T}{\partial \dot{q}^2}\ddot{q} + \frac{\partial^2 T}{\partial q \partial \dot{q}}\dot{q} - \frac{\partial T}{\partial q} \qquad (2)$$

или

$$Q = A(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}), \qquad (3)$$

где матрица $A(q) = \frac{\partial^2 T}{\partial \dot{q}^2}$, столбец $b(q, \dot{q}) = \frac{\partial^2 T}{\partial q \partial \dot{q}}\dot{q} - \frac{\partial T}{\partial q}$.

Столбец $b(q, \dot{q})$ пренебрежимо мал по сравнению с $A(q)\ddot{q}$ и не содержит быстро меняющихся [6] или периодических параметров при рабочих движениях ОПУ, следовательно, уравнение (3) можно записать в форме:

$$Q = A(q)\ddot{q}\ . \qquad (4)$$

Из-за больших передаточных отношений редукторов, именно осевые моменты инерции роторов двигателей практически полностью определяют инерционные свойства ОПУ, поэтому в матрице $A(q)$ следует учитывать только $J_{pj} \cdot i_j^2$. Моменты инерции функциональных звеньев располагаются в диапазоне от 5 до 50 кг·м^2, их учет изменяет норму матрицы $A(q)$ весьма медленно и не более чем на 2 %.

В силу хорошей статической уравновешенности механизмов и сравнительно небольшого трения при описании переходных режимов движения ОПУ моменты от сил тяжести звеньев и от сил трения можно не учитывать. Тогда движущие моменты преодолевают только моменты сил инерции роторов двигателей при их угловых ускорениях. Уравнение движения механической части (4) дополним характеристиками двигателей [9], учитывающими изменения их скоростей при изменении нагрузочного момента и времена запаздывания движущих моментов от напряжений $u_j(t)$.

Запишем линейное уравнение характеристик двигателей [1] в матричной форме:

$$\tau \dot{Q} + Q = -i^2 s\dot{q} + iru\,, \tag{5}$$

где $\tau = diag\{\tau_j\}_{3x3}$, $i^2 = diag\{i_j^2\}_{3x3}$, $s = diag\{s_j\}_{3x3}$ – диагональные матрицы собственных постоянных времени двигателей, квадратов передаточных отношений редукторов и крутизны статических характеристик двигателей, соответственно; $u = \{u_j\}_{3x1}$ – столбец управляющих двигателями параметров. Так как все матрицы в (4) и (5) диагональные, то эта система распадается на три одинаковые подсистемы. Запишем любую из них в форме параметров, приведенных к собственным углам поворота роторов [8]:

$$\begin{cases} M_{дв} = J_p \dot{\omega}_p \\ \tau \dot{M}_{дв} + M_{дв} = -s(\omega_p - \omega_{xx}) \end{cases}, \tag{6}$$

где $M_{дв} = Q/i$ – движущий момент, приложенный к ротору двигателя со стороны электромагнитного поля; $\omega_p = \dot{q}i$ – угловая скорость ротора; ω_{xx} – скорость холостого хода двигателя при номинальном управляющем параметре. В силу идентичности систем уравнений (4), (5) и (6) в последней системе индексы номеров двигателей опущены.

Для анализа динамических свойств системы на переходных режимах удобно оценить ее реакцию на ступенчатое воздействие. Предположим, что на двигатели мгновенно подается постоянное номинальное электрическое напряжение. Из (6) следует уравнение:

$$\ddot{\omega}_p + 2n\dot{\omega}_p + k^2\omega_p = k^2\omega_{xx}\,, \tag{7}$$

где $$n = \frac{1}{2\tau};\ k = \sqrt{\frac{1}{\tau\tau_M}};\ \tau_M = \frac{J_p}{s},$$

τ_M – механическая постоянная времени. Анализ решения уравнения (7) для ряда двигателей (см. табл. [2]) показал, что τ практически не оказывает влияния на переходные процессы.

Следовательно, нарастание скорости при ступенчатом управляющем воздействии $u = s\omega_{xx}/r$ зависит только от τ_M, полностью характеризующего инерционные свойства двигателя:

$$\omega_p = \omega_{xx}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_M}}). \tag{8}$$

Параметры двигателей

Таблица

№	Тип двигателя	Мощность Nдв, Вт	Скорость nдв, об/мин	Момент инерции ротора Jр, кгм2	Постоянная времени τ ,с	Механическаяпостоянная времени τ_M , с	Относительная скорость ω_p / ω_{xx}
1	2ПН90М	250	1120	0,004	0,0192	1,84	0,415
2	2ПН90М	370	1500	0,004	0,0179	2,17	0,366
3	2ПН90L	550	1500	0,005	0,0243	1,41	0,506
4	2ПН100М	750	1500	0,011	0,0306	1,94	0,397
5	2ПН100LМ	1100	1500	0,012	0,0377	1,43	0,499
6	2ПН112М	1500	1500	0,015	0,0110	1,38	0,514
7	2ПН112L	2200	1500	0,018	0,0145	0,94	0,657
8	2ПН132М	4000	1500	0,038	0,0195	1,09	0,598
9	2ПН132L	5500	1500	0,048	0,0217	0,81	0,712
10	2ПН160М	7500	1500	0,083	0,0273	0,79	0,72
11	2ПН200L	11000	800	0,3	0,0368	0,54	0,852
12	2ПН180М	15000	1500	0,2	0,0321	0,91	0,668
13	2ПН225L	18500	750	0,6	0,0253	0,72	0,754
14	2ПН250М	22000	750	1,05	0,0191	1,59	0,464
15	2ПН250L	30000	750	1,31	0,0360	0,19	0,713
16	2ПН280М	45000	750	2,2	0,0324	0,92	0,663
17	2ПН280L	55000	750	2,39	0,0320	1,1	0,597
18	2ПН315L	75000	750	4,52	0,0385	0,72	0,758
19	2ПН315М	110000	1000	4,09	0,0366	0,76	0,738
20	2ПФ315М	160000	1500	4,1	0,0350	0,8	0,718
21	2ПФ315L	200000	1500	4,44	0,0367	0,65	0,793

Из табл. видно, что у рассмотренных двигателей нет никакой связи между τ и τ_M.

Динамическая характеристика двигателя (5) при $\tau = 0$ называется механической (статической) характеристикой. На рис. показана зависимость отношения скоростей ω_p / ω_{xx} от τ_M в момент времени $t = 1$с.

Видно, что двигатель 2ПН200L за одну секунду способен разогнаться на 0,852 от ω_{xx}, а 2ПН90М на 0,366.

Изложенный в работе алгоритм оценки влияния параметров двигателей на переходные процессы в опорно-поворотном устройстве может быть использован при их выборе.

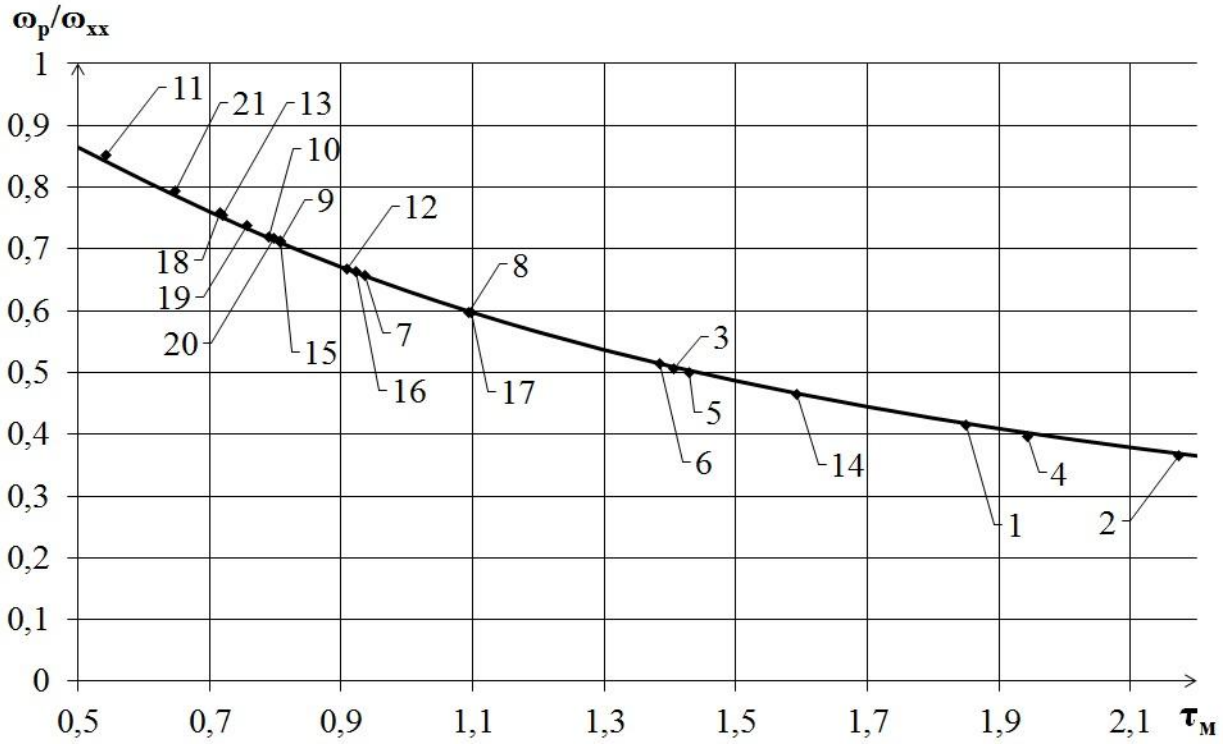


Рис. Влияние параметров двигателей на интенсивность разгона

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейц В.Л., Коловский М.З.,Кочура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов. М.: Наука, 1984. 352с.
2. Евграфов А.Н. Расчет и проектирование механизмов и машин с помощью ЭВМ. – СПб.: Изд-во СПб гос. тех. ун-та,1992. – 80 с.
3. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. О некоторых критериях качества, используемых при компьютеризированном синтезе механизмов. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й международной научно-технической конференции. 14-15 июня 2012 года, Санкт-Петербург / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 48-52
4. Евграфов А.Н., Терешин В.А., Хростицкий А.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями. Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011, № 2. – С. 170-176
5. Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Взаимовлияние приводов астробашни. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й международной научно-технической конференции. 14-15 июня 2012 года, Санкт-Петербург / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 540-547.

6. Петров Г.Н. Компьютерное моделирование механических систем в среде «Model Vision». Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009, № 91. – С. 239-244
7. Семенов Ю.А. Динамика машин, ч.2 (серия «Механика в политехническом университете»): Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 252 с.
8. Ю.А.Семенов, Н.С.Семенова. Теория механизмов и машин. Сборник задач и заданий. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 208 с.
9. Теория механизмов и машин: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений /М.З.Коловский, А.Н.Евграфов, Ю.А.Семенов, А.В.Слоущ. 3-е изд., испр. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 560 с.
10. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer – Verlag, 2000, 394 p.

УДК 531.391

М.Ю. Платовских

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХМАССОВОЙ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ



Михаил Юрьевич Платовских, к.т.н., доцент кафедры механики, Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”,
21-я линия В.О., д.2, Санкт-Петербург,
Тел.: +79817713240, e-mail: mplat.63@gmail.com

Аннотация

В условиях постоянно ужесточающихся требований по вибрации и шуму, предъявляемых к современным энергетическим установкам, возможности пассивной виброизоляции оказываются практически исчерпанными. Как результат в этой ситуации решающее значение приобретают активные виброзащитные системы (АВЗС). В работе исследуется динамика двухмассовой АВЗС. Определяется ее эффективность и области устойчивости.

Ключевые слова: активная виброзащитная система, коэффициент активной виброизоляции, электродинамический вибратор, критерий устойчивости Гурвица.

M. Ju. Platovsky

DYNAMIC MODEL OF THE TWO-MASS ACTIVE VIBROPROTECTIVE SYSTEM

M. Ju. Platovsky, National University of mineral resources “Gorniy”,
e-mail: mplat.63@gmail.com

Abstract

In the conditions of constantly becoming tougher requirements for vibration and the noise, shown to modern power installations, possibilities of passive vibration insulation are almost settled. As the result in this situation crucial importance is got by active vibroprotective systems (AVPS). In work dynamics of two-mass AVPS is investigated. Its efficiency and stability areas is defined.

Key words: active vibroprotective system, coefficient of active vibration insulation, electrodynamic vibrator, criterion of stability of Gurvits.

Наиболее эффективным способом борьбы с вибрацией является уменьшение переменных сил в источниках и цепях передачи энергии (двигателях внутреннего сгорания, зубчатых передачах, электродвигателях и т.п.). Но, естественно, при проектировании источников решающим является выполнение основной функциональной задачи - обеспечения передачи энергии от источника к приемнику с максимальным к.п.д. при обязательном выполнении требований к прочностным и ресурсным характеристикам. Виброактивность при этом часто отступает на второй план. Отсюда следует и ограниченность такого пути борьбы с вибрацией.

Для защиты технических и биологических объектов от вибрационного возбуждения в области низких частот в настоящее время разработано огромное количество виброзащитных систем (ВЗС), основанных на использовании широкого спектра амортизаторов. Такие ВЗС получили название пассивных. Однако их применение во многих случаях оказывается малоэффективным, например, при защите объектов от меняющихся во времени вибрационных спектров.

В последнее время нашли применение автоматизированные виброзащитные системы, получившие название активных (АВЗС) [1,2]. Создание эффективных активных систем виброгашения низкочастотной вибрации различных механизмов, возбуждаемой действием переменных усилий, является целью работ многих исследователей на протяжении нескольких последних десятилетий. В общем случае управление такими системами может быть реализовано на принципе компенсации возмущения, компенсации отклонения регулируемой величины, либо на комбинации обоих этих методов.

Опыт создания активных систем виброгашения показал, что наиболее перспективными в смысле полноты воспроизведения переменных усилий, сравнительной простоты реализации и управления, отсутствия чувствительности к негативным факторам окружающей среды являются электродинамические ВЗС, в которых в качестве исполнительного устройства служит электродинамический вибратор [3].

Характерной особенностью активных систем является использование активных цепей, состоящих из измерительных, усилительных и исполнительных элементов. Последние формируют силу, позволяющую уменьшить действующие на защищаемый объект динамические нагрузки.

В активных ВЗС для создания управляющего воздействия (управления) необходима информация о характере возмущений, его частотном и амплитудном составе. Роль источников этой информации выполняют электрические преобразователи вибраций, выступающие здесь как преобразователи параметров движения (силы, ускорения, перемещения) в электрические сигналы (напряжение, ток). Используемые преобразователи (датчики перемещения, силы, акселерометры и т.д.) должны иметь достаточно широкий частотный диапазон (по меньшей мере, в пять раз шире частотного

диапазона измеряемого сигнала) и малый коэффициент нелинейных искажений. Электрические сигналы как управляющие воздействия должны быть пропорциональны возмущающей силе *Q(t)*. При изменении частоты и амплитуды внешнего воздействия частота и амплитуда тока (напряжения) должны изменяться аналогичным образом.

Колебательную систему с электродинамическим вибратором можно рассматривать как объект автоматического управления и применять для ее исследования разработанные в теории автоматического регулирования методы [1, 2]. При составлении системы уравнений, описывающих динамику механической колебательной системы с электродинамическим генератором силы, следует учитывать как механическое движение, так и электрические процессы в цепи проводника (подвижная катушка). В электродинамических устройствах ток для создания силы возникает в результате движения или самого проводника или точек его подвеса.

Проведем исследование моделей АВЗС с различными схемами подключения электродинамического вибратора и приложения внешней динамической нагрузки. При этом во всех случаях ставится задача снижения динамической нагрузки на фундамент. Моделирование производится в области низких частот.

Рассмотрим изображенную на рис. 1 модель АВЗС. Предположим, что ставится задача активной виброизоляции некоторой упругозакрепленной массы (m_1) в околорезонансном диапазоне (рассматриваются относительно низкие частоты) На массу действует внешняя возмущающая сила *Q(t)*. С целью установки вибратора вводится дополнительная масса (m_2), крепящаяся к изолируемой массе с помощью упругих элементов (c_2). Параллельно упругим связям включены также диссипативные элементы с коэффициентом сопротивления $b_{1,2}$. Между «проставочной» плитой и неподвижным основанием установлен датчик силы Д, преобразующий силу, действующую на плиту в управляющий сигнал (напряжение u на зажимах катушки).

Система описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 &= -c_1x_1 + c_2\left(x_2 - x_1\right) - b_1\dot{x}_1 + Q - F, \\ m_2\ddot{x}_2 &= -c_2\left(x_2 - x_1\right) - b_2\dot{x}_2 + F, \\ L\frac{di}{dt} &+ Ri = U - B\ell\left(\dot{x}_2 - \dot{x}_1\right). \end{aligned} \qquad (1)$$

Первые два уравнения системы (1) характеризует движение масс m_1 и m_2, третье – электродинамическое равновесие в цепи подвижной катушки вибратора. В этих уравнениях x_1 и x_2- абсолютные координаты масс; $Q=Q(t)$ –внешняя возмущающая сила; i- ток в цепи обмотки управления электродинамического вибратора; $F=F(i)$ – пондеромоторная сила в зависимости от тока в обмотке; L, R – индуктивность и активное сопротивление обмотки управления; U – напряжение на обмотке подвижной катушки.

В соответствии с законом Ампера, $\mathrm{F(i)} = B\ell i$. Для создания необходимого напряжения на обмотке управления электромагнита, между датчиком силы и электромагнитом устанавливается усилитель, который, в свою очередь, может содержать корректирующую цепь для обеспечения динамических требований к ВЗС (быстродействие, точность отработки задающего сигнала и др.).

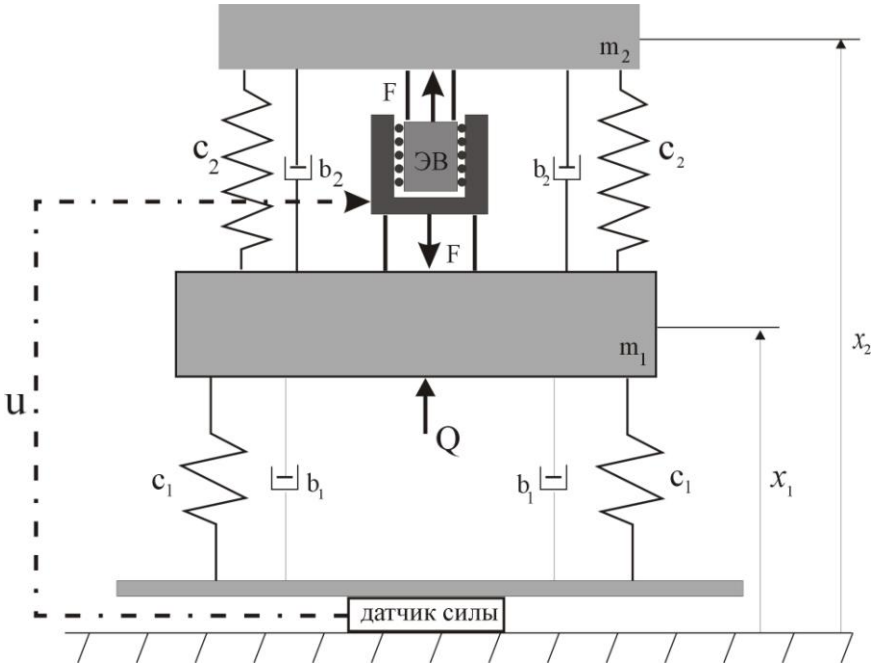


Рис. 1. Модель двухмассовой АВЗС.

В рассматриваемой системе предполагается, что постоянные времени различных элементов в цепи обратной связи существенно меньше постоянной времени вибратора $T_э$.

Управление вводится как отрицательная обратная связь по суммарной силе, действующей на основание (датчик Д): $U = -k_U\left(b_1\dot{x} + c_1 x_1\right)$, где коэффициент пропорциональности между напряжением на обмотке и силой $k_U = k_д\, k_{yc} > 0$ ($k_д$, k_{yc} – коэффициенты чувствительности датчика силы и усиления усилителя).

Перейдя к новым параметрам:

$$\lambda_1^2 = \frac{c_1}{m_1},\quad \lambda_2^2 = \frac{c_2}{m_2},\quad \lambda_{12}^2 = \frac{c_2}{m_1},\quad \beta_1 = \frac{b_1}{m_1},\quad \beta_2 = \frac{b_2}{m_2},$$
$$T_э = \frac{L}{R},\quad \rho = \frac{B\ell}{m_2}, k_1 = \frac{k_u b_1}{R},\quad k_2 = \frac{k_u c_1}{R},\quad \mu = \frac{B\ell}{R}.$$

и применив к (1) преобразование Лапласа с параметром p ($x \Rightarrow \bar{x}, i \Rightarrow \bar{i}, \bar{q} = \frac{1}{m_1}\bar{Q}$), получим линейную систему для определения $\overline{x_1}, \overline{x_2}, \bar{i}$:

$$\begin{aligned}
&\left(p^2 + p\,\beta_1 + \lambda_1^2 + \lambda_{12}^2\right)\overline{x_1} - \lambda_{12}^2\,\overline{x_2} + \rho_1\,\bar{i} = \overline{q},\\
&-\lambda_2^2\,\overline{x_1} + \left(p^2 + p\,\beta_2 + \lambda_2^2\right)\overline{x_2} - \rho_2\,\bar{i} = 0,\\
&\left(p\left(k_1 - \mu\right) + k_2\right)\overline{x_1} + p\,\mu\,\overline{x_2} + \left(1 + T_э\right)\bar{i} = 0.
\end{aligned} \qquad (2)$$

Численно решая систему (7), (используется среда программирования MATLAB), находим $\overline{x_1}, \overline{x_2}, \bar{i}$.

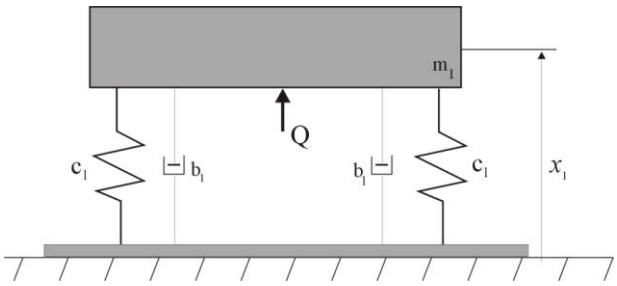


Рис. 2. Схема пассивной ВЗС.

Преобразование Лапласа от силы, передаваемой на фундамент (через упругий элемент c_1 и демпфер b_1): $\overline{R_\phi} = \left(b_1\,p + c_1\right)\overline{x_1}$.

Рассмотрим пассивную систему (рис. 2), соответствующую исследуемой двухмассовой системе
Соответствующее ей уравнение движения**:**

$$m_1\ddot{x}_1 = -c_1 x_1 - b_1\dot{x}_1 + Q\,. \qquad (3)$$

Выполняя преобразование Лапласа, получим:

$$\overline{x_1} = \frac{\bar{q}}{\left(p^2 + p\,\beta_1 + \lambda_1^2 + \lambda_{12}^2\right)}.$$

Преобразование Лапласа силы, передаваемой на основание при пассивной виброизоляции:

$$\overline{R_{\phi\,0}} = \left(b_1 p + c_1\right)\overline{x_1} = \frac{\left(b_1 p + c_1\right)}{\left(p^2 + p\,\beta_1 + \lambda_1^2 + \lambda_{12}^2\right)}\bar{q}\,. \qquad (4)$$

Показатель, определяющий эффективность применения активной системы по отношению к пассивной - коэффициент активной виброизоляции γ :

$$\gamma = \frac{\overline{R_\phi}(p)}{\overline{R_{\phi\,0}}(p)}.$$

Условием эффективной активной виброизоляции является неравенство γ>1.

Подставляя теперь $p = i\cdot\omega\ \left(i = \sqrt{-1}\right)$, ($\omega$ – частота колебаний), получим частотную зависимость для коэффициента виброизоляции. На рисунке 3 построены зависимости $\mathrm{mod}\left(\gamma(\omega)\right)$ в зависимости от частоты при следующих значениях параметров (большинство из них для примера взяты из [4]): m_1=100 кг, m_2=10 ÷ 50 кг, c_1=5·10^3 Н/м (собственная частота пассивной системы $c_1 - m_1$ $\lambda_1 \approx 14\,\mathrm{c}^{-1}$), c_2=1·10^2 Н/м, R= 40 Ом, L= 5 мГн, $B\ell$ = 100 Тл·м, b_1=b_2=70 Нс/м, k_u=3.

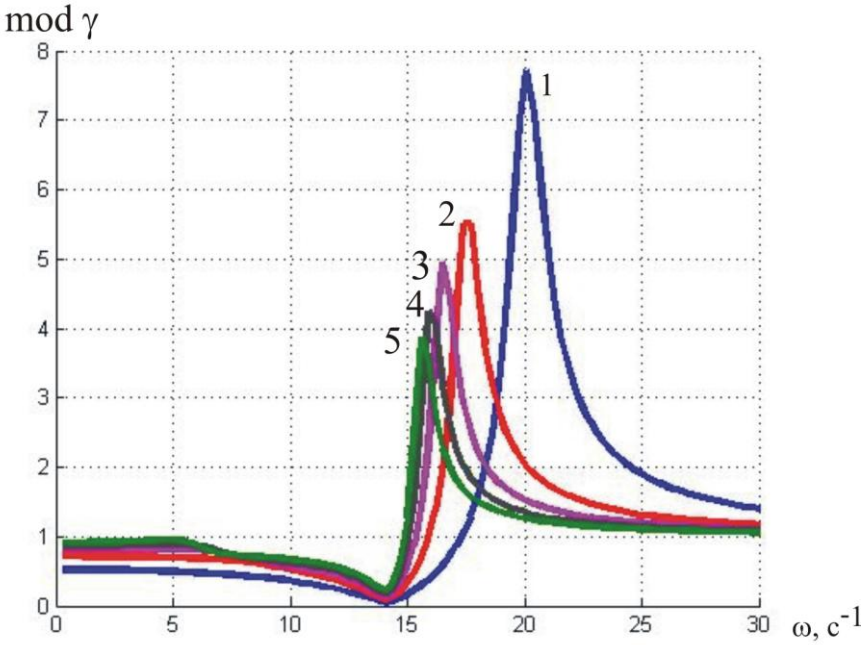


Рис. 3. Кривые зависимости коэффициента γ от частоты ω, построенные для различных значений массы m_2: кривая 1 – m_2 = 10 кг, 2 – 20 кг, 3 – 30 кг, 4 – 40 кг, 5 – 50 кг.

Исследуем устойчивость данной системы, применяя критерий Гурвица. Характеристическое уравнение системы (2) будет иметь вид:

$$\Delta(\mathrm{p}) = \begin{vmatrix} \mathrm{p}^2 + \beta_1 \mathrm{p} + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 & -\lambda_{12}^2 & \rho_1 \\ -\lambda_2^2 & \mathrm{p}^2 + \beta_2 \mathrm{p} + \lambda_2^2 & -\rho_2 \\ (\mathrm{k}_1 \mu)\mathrm{p} + \mathrm{k}_2 & \mu \mathrm{p} & \mathrm{T}_э \mathrm{p} + 1 \end{vmatrix} = 0. \qquad (5)$$

Раскрыв определитель, получим уравнение пятой степени по p:

$$a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0,$$

где коэффициенты $a_{1\ldots}a_2$:

$$\begin{aligned}
a_0 &= T_Э, \\
a_1 &= T_Э(\beta_1 + \beta_2) + 1, \\
a_2 &= T_Э\left(\lambda_1^2 + 2\cdot\lambda_2^2 + \beta_1\beta_2\right) - \rho_1(k_1 - \mu) + \rho_2\mu + \beta_1 + \beta_2, \\
a_3 &= T_Э\,\beta_2\left(\lambda_1^2 + \lambda_2^2\right) + T_Э\,\beta_1\lambda_2^2 - \rho_1(k_1 - \mu)\beta_2 - \rho_1 k_2 + \rho_2\beta_1\mu + \lambda_1^2 + 2\cdot\lambda_2^2 + \beta_1\beta_2, \\
a_4 &= T_Э\,\lambda_2^2\left(\lambda_1^2 + \lambda_2^2\right) - \rho_1\lambda_2^2\mu - \rho_1(k_1 - \mu)\lambda_2^2 - \rho_1\beta_2 k_2 + (\rho_2\mu + \beta_2)\left(\lambda_1^2 + \lambda_2^2\right)\mu - T_Э\,\lambda_2^2\lambda_{12}^2 + \\
&\quad + \beta_1\lambda_2^2 + \rho_2(k_1 - \mu)\lambda_{12}^2, \\
a_5 &= \rho_2\lambda_{12}^2 k_2 - \rho_1\lambda_2^2 k_2 + \lambda_2^2\left(\lambda_1^2 + \lambda_2^2\right) - \lambda_1^2\lambda_2^2.
\end{aligned} \qquad (6)$$

Критерий Гурвица а данном случае [5] сводится к следующим неравенствам:

$$a_i > 0, i = 0,...,5;$$
$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0; \qquad (7)$$
$$\Delta_4 = (a_1 a_2 - a_0 a_3)\cdot(a_3 a_4 - a_2 a_5) - (a_1 a_4 - a_0 a_5)^2 > 0.$$

Здесь Δ_2, Δ_4 – определители Гурвица 2-го и 4-го порядков, соответствующие характеристическому уравнению пятой степени. Области устойчивости, численно построенные по формулам (6), (7), приведены на рис. 4.

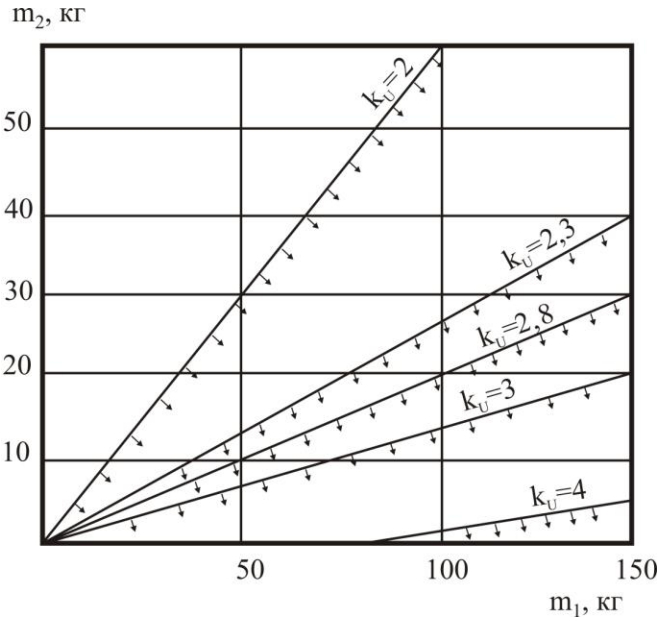


Рис. 4. Области устойчивости системы (расположены между осью абсцисс и соответствующей верхней границей) при различных значениях коэффициента усиления k_U .
Значения остальных параметров те же, что и на рис. 3. При $k_U > 4{,}2$ система неустойчива.

Из проведенных расчетов видно, что АВЗС, соответствующая рассматриваемой модели, в значительной мере эффективна (до $\gamma \approx 8$) и устойчива в диапазоне частот 15 ÷ 25 $с^{-1}$. Расширение этого диапазона возможно путем увеличения коэффициента обратной связи k_U, однако при этом система теряет устойчивость. Увеличение магнитного потока B позволяет расширить частотный диапазон эффективности, однако значительно снижает величину эффективности mod γ. Таким образом, для более эффективного функционирования АВЗС, построенной на основании рассмотренной модели требуется введение в систему управления дополнительных корректирующих звеньев, основанных на применении программируемых контроллеров.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем виброзащиты в условиях воздействия широкополосной не-

стационарной вибрации: сидений водителей автотранспорта, рабочих мест операторов горнодобывающих комбайнов [6] и пилотов самолетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К. В. Фролов, Ф. А. Фурман Прикладная теория виброзащитных систем.– М.: Машиностроение, 1980. – 276 с.
2. М. З. Коловский Автоматическое управление виброзащитными системами. –М.: Наука, 1976. – 317 с.
3. Электродинамические вибраторы / М.Д. Генкин [и др.].– М.: Машиностроение, 1975. – 96 с.
4. М. Д. Генкин, В. Г. Елезов, В. В. Яблонский, Э. Л. Фридман. Развитие методов виброгашения // Методы виброизоляции машин и присоединенных конструкций. – М.: Наука, 1975. – С. 58-66.
5. М. Д. Генкин, В. Г. Елезов, В. В. Яблонский. Методы активного гашения вибраций механизмов // Динамика и акустика машин.– М.: Наука, 1971. – С. 70-88.
6. М. Ю. Платовских. Исследование динамики перфоратора // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. / Под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 585 – 591.

УДК 621.01

В.И. Пожбелко

АЛГОРИТМ БЫСТРОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И НАПРАВЛЕННОГО СИНТЕЗА САМОУСТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ МЕХАНИЗМОВ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ НОВОЙ ФОРМУЛЫ ПОДВИЖНОСТИ



Владимир Иванович Пожбелко, д.т.н., профессор
Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет)
Россия, Челябинск, E-mail: izdat@susu.ac.ru

Аннотация

Предлагаемый алгоритм быстрого определения числа степеней свободы и направленного структурного синтеза сложной многозвенной механической системы заключается в её геометрическом представлении в виде (рассчитываемого на основе новой структурной формулы автора) всего конечного множества наборов различных многошарнирных звеньев и многократных шарниров – гарантированно образующих статически определимую цепь с заданным числом изменяемых замкнутых контуров.

Ключевые слова: структурный анализ, синтез статически определимых рычажных и планетарных механизмов, алгоритм конструирования.

ALGORITM OF QUICK STRUCTURAL ANALYSIS AND DIRECTED SYNTHESIS ELF-ALIGNING MECHANICAL SYSTEMS IN THE PRESENT MACHINE-BUILDING ON BASE NEW DEGREE OF FREEDOM EQUATION

Vladimir I. Pozhbelko, Prof., Dr. sc. tech., South-Ural University, Russia,
e-mail: izdat@susu.ac.ru

Abstract

Offered algorithm quick defining degree of freedom and directed structural synthesis of the complicated many-links mechanical system with simple and complex frequent pin-joints consist in its geometrical representation as a finite multitude various many-hinge levers, calculating by new author structural equation and next its combining in the close static-define kinematic chain by original directed algorithm.

Key words: structural analysis, synthesis of mechanisms, design algorithm.

1. Постановка задачи и предлагаемый путь её решения

Широко используемая в теории механизмов и машин структурная формула для расчёта подвижности механических систем является базовым основанием для структурного анализа и структурного синтеза механизмов, удовлетворяющих поставленным условиям ещё на первом этапе их создания для разных областей техники (приводы, фермы, роботы) [1] – [15].

В настоящее время в различных учебниках по ТММ для ВТУЗов и в другой научно-технической литературе [1] – [8] при структурном анализе и синтезе плоских механизмов используется известная формула степени подвижности П.Л.Чебышева (предложенная им ещё в 1869 году для простейшего шарнирного четырёхзвенника), которая имеет следующие органические недостатки:

а) выражает традиционное представление строения механизма в виде общей совокупности «безликих звеньев и условных кинематических пар»;

б) требует подсчёта общего числа всех кинематических пар и всех подвижных звеньев, что делает весьма трудоёмким и иногда даже ошибочным структурный анализ сложных многозвенных механизмов;

в) является неинформативной о требуемом выполнении отдельных звеньев механической системы без вредных избыточных связей, из-за чего структурный синтез перспективных самоустанавливающихся (статически определимых) механизмов становится вообще неопределённым и кажется бесконечным (непредсказуемым).

Рассмотрим возможности устранения указанных недостатков (препятствующих разработке рациональных алгоритмов структурного анализа и структурного синтеза различных механических систем) – за счёт применения в современной теории механизмов и машин предложенной автором [14] новой структурной формулы подвижности, применяемой ниже для решения различных прикладных задач механики.

В связи с этим на основе структурных математических моделей [11], [12], [14], [15] предлагается перейти к более наглядному и очевидному геометрическому представлению механической системы и представить её в виде расчётного конечного набора многошарнирных звеньев и многократных шарниров, гарантированно образующих (после их сборки между собой) статически определимую кинематическую цепь с заданным числом взаимно независимых изменяемых замкнутых контуров K.

П р и м е ч а н и е. Рассматриваемая в работах [11] – [15] «Единая теория структуры» основана на «Универсальной структурной классификации механических систем по *уровню их сложности* $Y = K - 1$» (любого возможного строения и с любыми видами связей [12], согласно которой любые одноконтурные механизмы и фермы ($K = 1$) относятся к системам нулевого уровня сложности $Y = 0$ ($Y = K - 1 = 0$). Более сложные по величине $K > 1$ структуры, например, пятиконтурные ($K = 5$ – см. ниже табл. 1) –

соответственно относятся к системам 4-го уровня сложности ($Y = K - 1 = 5 - 1 = 4$). Соответственно все открытые кинематические цепи, например, роботов ($K = 0$) представляют по данной классификации системы отрицательного (минимально возможного) уровня сложности $Y = -1$ ($Y = K - 1 = 0 - 1 = -1$).

2. Общие структурные формулы и математическая модель строения механических систем без избыточных связей

Представленные ниже аналитические структурнее зависимости получены на основе единой теории структуры [11] – [15] и описывают строение плоских механических систем с одноподвижными кинематическими парами ($H = 1$), существующих в трехподвижном ($h = 3$) пространстве и имеющих заданную степень подвижности W ($W \geq 1$ – механизмы, $W = 0$ – фермы).

1. Новая структурная формула подвижности W для определения числа степеней свободы механической системы:

$$W = \left[2n_1 + (n_2 - 3)\right] - \left[n_4 + 2n_5 + 3n_6 + ... + (K-2)n_{k+1}\right] - \nu . \qquad (A)$$

Принятые обозначения:

n_1 – число одношарнирных звеньев; n_2 – число двухшарнирных звеньев; n_3 – число трехшарнирных звеньев (в данную формулу не входит); n_4 – число четырехшарнирных звеньев; n_5 – число пятишарнирных звеньев; n_6 – число шестишарнирных звеньев; n_{K+1} – число наиболее сложных $(K+1)$-шарнирных звеньев;

K – число образуемых звеньями данной системы взаимно независимых изменяемых замкнутых контуров;

ν – приведенное число многократных шарниров, учитывающее число всех двойных шарниров (ν_2), тройных (ν_3) и т.д. j – кратных шарниров[14]:

$$\nu = \nu_2 + 2\nu_3 + 3\nu_4 + 4\nu_5 + ... + (K-1)\nu_k \leq 2(K-1). \qquad (B)$$

В ы в о д ы. Из анализа слагаемых новой структурной формул подвижности (А) следует, что в плоских механических системах ($h = 3$) влияние на величину W применяемых различных многошарнирных звеньев существенно зависит от их строения:

а) число применяемых в системе трехшарнирных звеньев (n_3) вообще не влияет на величину её подвижности W; **б)** добавление одно- и двухшарнирных звеньев приводит к увеличению W; **в)** добавление более сложных звеньев (четырехшарнирных, пятишарнирных и т.д.) и многократных шарниров ($\nu = 1$, $\nu = 2$, … и т.д.) , наоборот, приводит к снижению W.

2. Общее число звеньев механической системы можно представить в виде совокупности взаимосвязанных между собой линейных и многоугольных рычагов с различным числом шарниров, образующих следующий конечный арифметический ряд, однозначно ограниченный задаваем числом замкнутых контуров K:

$$\tilde{n} = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + ... + n_{K+1}. \qquad (C)$$

3. Определитель D целевой функции структурного синтеза механических систем без избыточных связей (получается преобразованием формулы подвижности (A)):

$$D = (2n_1 + n_2) - [n_4 + 2n_5 + 3n_6 + ... + (K-2)n_{K+1}] - (W + \nu + 3) = 0, \qquad (D)$$

где целевая функция $D = 0$ указывает на отсутствие дефектов структуры исследуемого механизма ($W \geq 1$) или фермы ($W = 0$), а величина $D \neq 0$ указывает на наличие вредных избыточных связей (случай $D < 0$) или лишних подвижностей (случай $D > 0$).

4. Структурная математическая «VIP-модель» плоских статически определимых механических систем представляет совместную систему линейных алгебраических уравнений (A), (B), (C) вида:

$$\left.\begin{array}{l} D = (2n_1 + n_2) - [n_4 + 2n_5 + 3n_6 + ... + (K-2)n_{K+1}] - (W + \nu + 3) = 0; \\ \nu = \nu_2 + 2\nu_3 + 3\nu_4 + 4\nu_5 + 5\nu_6 + ... + (K-1)\nu_K \leq 2(K-1); \\ \tilde{n} = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + ... + n_{K+1} = (W+1) + 2K \end{array}\right\}, \qquad (E)$$

всё конечное множество целочисленных решений которых при заданных значениях $W = 1$, $h = 3$, $H = 1$ ($K = 1$, $K = 2$, $K = 3$, $K = 4$, $K = 5$) представляет все различные возможные типы строения в виде наборов конкретных значений ν, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6. Данные наборы систематизированы в виде сводной таблицы 1, названной «Универсальная структурная таблица расчетных стандартных кодов правильного строения одноподвижных механизмов».

Представленные в табл.1 целочисленные структурные решения охватывают механические системы как только с простыми шарнирами ($\nu = 0$), так и системы с многократными шарнирами ($\nu \neq 0$) – это позволяет ***утверждать,*** что в области решений $D = 0$ существует только:

а) **1** ***вариант*** кода строения (один тип структуры) одноконтурных 4-звенных механизмов; б) **3** ***варианта*** кодов строения (типов структуры) двухконтурных 6-звенных механизмов; в) **9** ***вариантов*** кодов строения трехконтурных 8-звенных механизмов; г) **23** ***варианта*** кодов строения четырехконтурных 10-звенных механизмов; д) **53** ***варианта*** кодов строения пятиконтурных 12-звенных механизмов.

5. Предлагаемый цифровой код строения механической системы в виде конкретного набора структурных параметров вида:

$$\frac{n_2 n_3 n_4 n_5 n_6 \ldots n_{K+1}}{\nu} \qquad \text{(F)}$$

однозначно определяет (см. «Универсальную структурную таблицу 1») не только общее число звеньев системы согласно зависимости (C), но и число образуемых звеньями системы (после их сборки между собой) взаимно независимых изменяемых замкнутых контуров K (величина K будет равна количеству цифр в числителе дроби кода строения).

У т в е р ж д е н и е. Из анализа третьего уравнения ($\tilde{n}$) структурной математической «VIP-модели» (E) следует необходимое условие синтеза плоских ($h=3$) безызбыточных систем: при заданном *нечётном* значении W – общее число звеньев $\tilde{n}$ должно быть *чётным*, а при заданном *нулевом* или *чётном* значении W – общее число звеньев $\tilde{n}$ должно быть нечётным.

П о я с н е н и е. Учитывая известные в ТММ методы эквивалентной замены многоподвижных кинематических пар ($H>1$) на одноподвижные ($H=1$), можно (при сохранении заданной подвижности W и заданного числа изменяемых замкнутых контуров K) любой механизм представить в виде шарнирной многозвенной системы и использовать математическую « VIP-модель» (E) для направленного структурного синтеза с целевой функцией $D=0$ (D) не только рычажных, но и, например, зубчатых и кулачковых механизмов. В данной статье ниже рассмотрены примеры такой эквивалентной взаимозаменяемости при структурном синтезе самоустанавливающихся зубчатых планетарных механизмов с равномерно нагруженными сателлитами (это основная задача современного машиностроения).

З а м е ч а н и е. Необходимо отметить, что в любых механических системах (например, в механизмах или фермах) с многократными (совмещенными) шарнирами [14], [15] численное понятие «многошарнирности» *не совпадает* с численным понятием «многопарности». Например, обычный **двух***шарнирный* рычаг (конструктивно содержащий по своим концам только 2 отверстия под оси шарниров) – в механизме с многократными шарнирами [14, схема на рис. 1] будет являться «**трех***парным*», так как входит в 3 (три) кинематические пары с другими звеньями механизма. Непонимание этого факта несовпадения может вызвать терминологические трудности у специалистов-механиков и привести к ошибкам в расчётах.

Таблица 1

Универсальная структурная таблица расчётных стандартных кодов правильного строения одноподвижных механизмов

$W = 1, h = 3, H = 1$													
$K = 1$ ($\tilde{n} = 4$)		$K = 2$ ($\tilde{n} = 6$)			$K = 3$ (9 кодов строения $\tilde{n} = 8$)								
ν	0	0	1	2	0	0	0	1	1	2	2	3	4
n_2	4	4	5	6	4	5	6	5	6	6	7	7	8
n_3	–	2	1	0	4	2	0	3	1	2	0	1	0
n_4	–	–	–	–	0	1	2	0	1	0	1	0	0

$K = 4$ (23 кодов строения $\tilde{n} = 10$)																						
ν	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5	6
n_2	4	5	6	6	7	7	8	5	6	7	7	8	6	7	8	8	7	8	9	8	9	9	10
n_3	6	4	2	3	0	1	0	5	3	1	2	0	4	2	0	1	3	1	0	2	0	1	0
n_4	0	1	2	0	3	1	0	0	1	2	0	1	0	1	2	0	0	1	0	0	1	0	0
n_5	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

$W = 1, h = 3, H = 1$																									
$K = 5$ (53 кодов строения $\tilde{n} = 12$)																									
ν	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
n_2	4	5	6	6	7	7	7	8	8	8	8	9	9	9	10	5	6	7	7	8	8	8	9	9	9	10
n_3	8	6	4	5	2	3	4	0	1	2	2	0	0	1	0	7	5	3	4	1	2	3	0	1	1	0
n_4	0	1	2	0	3	1	0	4	2	0	1	1	2	0	0	0	1	2	0	3	1	0	2	0	1	0
n_5	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2	0	1
n_6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1

$K = 5$ (продолжение)																									
ν	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	7	8
n_2	6	7	8	8	9	9	9	10	10	7	8	9	9	10	10	8	9	10	10	11	9	10	11	10	11	11	12
n_3	6	4	2	3	0	1	2	0	0	5	3	1	2	0	1	4	2	0	1	0	3	1	0	2	0	1	0
n_4	0	1	2	0	3	1	0	0	1	0	1	2	0	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0
n_5	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
n_6	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Обозначения в таблице 1:

K – ***число взаимно независимых изменяемых замкнутых контуров;***

ν – ***приведенное число многократных шарниров;***

$\tilde{n}$ – ***общее число звеньев механизма (включая стойку);***

n_2 – ***число двухшарнирных звеньев;***

n_3 – ***число трехшарнирнх звеньев;***

n_4 – ***число четырехшарнирных звеньев;***

n_5 – ***число пятишарнирных звеньев;***

n_6 – ***число шестишарнирных звеньев***

3. Теоремы о строении замкнутых механических систем без избыточных связей ($D=0$)

Доказательство теорем следует из структурных формул (A), (B), (C), (D), (E) и подтверждается всеми без исключения 89 цифровыми стандартными кодами правильного строения из универсальной структурной таблицы 1 (для всех 89 кодов структуры целевая функция $D=0$).

Теорема 1. Замкнутая механическая система без избыточных связей должна обязательно содержать двухпарные звенья, минимальное количество которых зависит от задаваемой степени подвижности W и числа многократных шарниров, а максимальное количество которых равно общему числу звеньев системы $\tilde{n}$:

$\tilde{n} \geq n_2 \geq h + W + \nu = 3 + W + \nu$; $\qquad n_{2\min} = h + W + \nu = 3 + W + \nu$.

Теорема 2. Число шарниров на одном звене i, посредством которых собирается замкнутая механическая система, а также общее число звеньев системы $\tilde{n}$ должно быть ограничено в зависимости от числа K изменяемых замкнутых контуров механической системы в пределах, равных $(K+1)$:

$i \leq K+1$; $\qquad i_{\max} = K+1$; $\qquad \tilde{n} = n_2 + n_3 + n_4 + n_{K+1}$.

Теорема 3. Число наиболее сложных многошарнирных звеньев должно быть не более одного – в структуре механических систем с простыми и многократными шарнирами ($\nu \neq 0$) и не более двух – в структуре механических систем только с простыми (однократными) шарнирами ($\nu = 0$):

$n_{K+1} = 0;1$, $(\nu \neq 0)$; $\qquad n_{K+1} = 0;1;2$, $(\nu = 0)$.

Теорема 4. Общее приведенное число многократных шарниров ν должно быть ограничено в зависимости от числа возникающих в механической системе взаимно независимых изменяемых замкнутых контуров K:

$$\nu = \nu_2 + 2\nu_3 + 3\nu_4 + 4\nu_5 + \ldots + (j-1)\nu_j \leq 2(K-1),$$

а наибольшая кратность j шарниров равна числу K:

$j_{\max} = K$.

Теорема 5. Общее число звеньев $\tilde{n}$ замкнутой механической статически определимой системы должно выбираться из разных арифметических рядов – при задаваемых *нечётных* значениях W $(W=1,\ W=3,\ W=5,\ldots)$ $\tilde{n}$ должно быть *чётным* $(\tilde{n}=4,\ \tilde{n}=6,\ \tilde{n}=8,\ \tilde{n}=10,\ \tilde{n}=12)$; а при задаваемых *других* значениях W $(W=0,\ W=2,\ W=4,\ldots)$ – $\tilde{n}$ должно быть *нечётным*.

4 Структурный анализ многозвенных механических систем

Алгоритм структурного анализа:

1. В кинематической цепи исследуемой системы определяется число многошарнирных звеньев $n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, \ldots$ (вместе со стойкой и с учетом в качестве условных шарниров и поступательных пар, если они есть), а также многократных шарниров.

2. Рассчитывается число степеней свободы по формуле (А).

3. Составляется цифровой код строения исследуемой системы (F) и производится его сравнение со стандартными кодами строения из «Универсальной структурной таблицы 1»:

а) совпадение составленного кода строения с одним из 89 стандартных кодов в табл.1 автоматически означает отсутствие вредных избыточных связей в данной механической системе (она статически определима);

б) выявленное несовпадение составленного и стандартного кодов строения (по таблице 1) указывает конкретные пути перестройки исходной системы для устранения дефектов структуры, приводящих к вредным избыточным связям (способы перестройки рассмотрены на примерах в [14]);

в) диапазон анализируемых и синтезируемых механических систем может быть предельно расширен на основе представленных в работе [15] разных «Универсальных структурных таблиц», содержащих все множество рассчитанных по «VIP-модели» (F) стандартных кодов строения статически определимых ферм ($W=1$), одноподвижных ($W=1$) и многоподвижных ($W=2, W=3$) механизмов.

Примеры структурного анализа и определения W.

З а д а ч а 1. Определить число степеней свободы (подвижность) представленной на рис. 1 механической системы ($\nu=0, n_2=4$).

Решение задачи. По новой структурной формуле подвижности (А) сразу (без традиционного подсчета общего числа кинематических пар и общего числа звеньев) определяем:

$W = n_2 - 3 = 4 - 3 = 1$.

Примечание. Для проверки правильности полученного результата и оценки трудоемкости расчетов по другим формулам можно использовать традиционные формулы подвижности (П.Л.Чебышева, О.Г. Озола и др.).

З а д а ч а 2. Для представленного на рис. 2 шарнирно-рычажного механизма с кодом строения $64200/0$ ($n_2=6, n_3=4, n_4=2, n_5=0, n_6=0 / \nu=0$) определить подвижность W, число взаимно независимых изменяемых замкнутых контуров K в его структурной схеме, а также установить наличие или отсутствие избыточных связей (и определить пути их устранения).

Решение задачи.

1. Число степеней свободы (степень подвижности) представленного механизма рассчитываем по новой структурной формуле подвижности(А):

$W = (n_2 - 3) - n_4 = (6-3) - 2 = 1$.

2. Число взаимно независимых замкнутых контуров – сразу равно 5 (это число цифр в числителе данного кода строения), что можно подтвердить 3-мя способами (по «Универсальной структурной таблице 1», по известной в ТММ формуле Х.И. Гохмана или визуально по схеме на рис. 2).

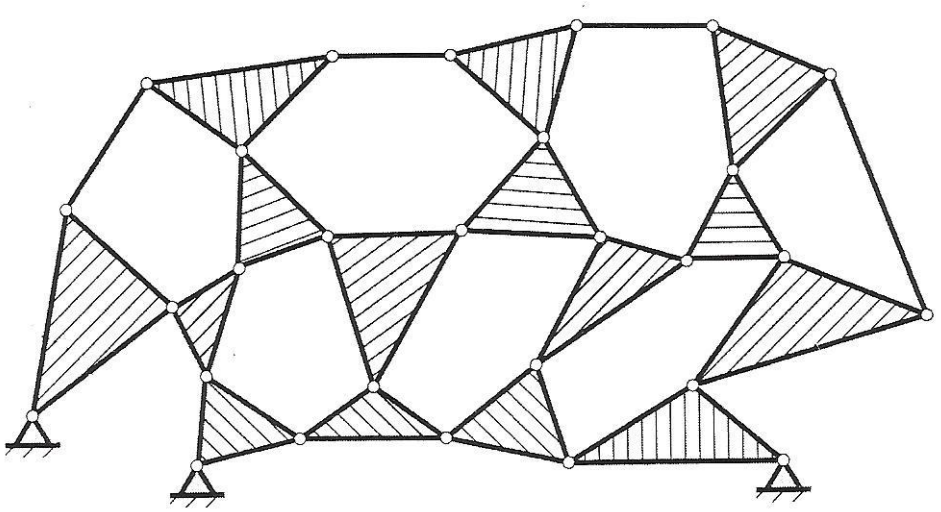
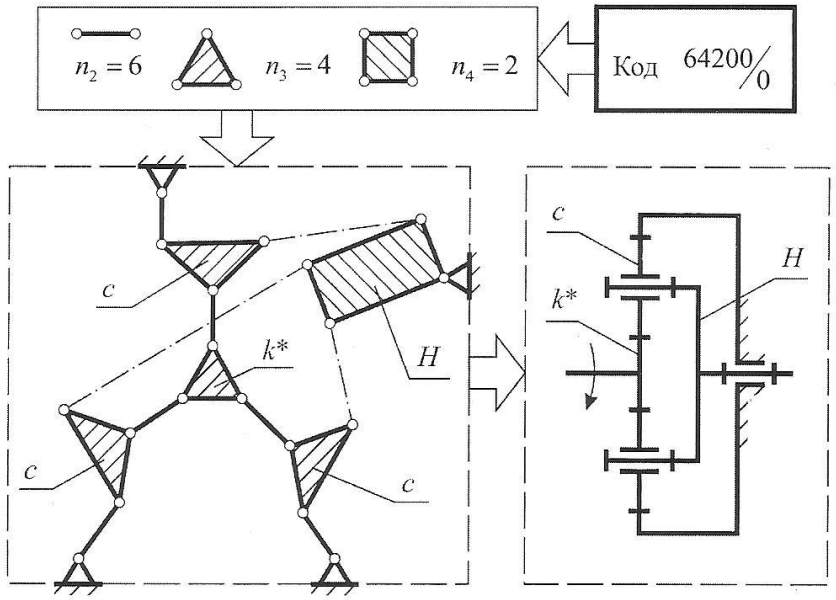


Рис. 1. Структурная схема многозвенной механической системы



а) $\tilde{n} = 12$ ***(***$W = 1, K = 5; D = 0$***)*** ***б)*** $k_0 = 3$ ***(***$W = 1, K = 5; D = 0$***)***

Рис. 2. Синтезированные 12-звенный шарнирно-рычажный и 6-звенный трёхсателлитный планетарный ($k_0 = 3$) и шарнирно-рычажный пятиконтурные аналоги ($K = 5$) – стандартный код строения $64200/0$, где $n_2 = 6$ (зубчатые зацепления трех сателлитов); $n_3 = 4$ (три сателлита и плавающая центральная шестерня); $n_4 = 2$ (водило и неподвижное центральное колесо); $n_5 = 0$; $n_6 = 0$

3. Наличие данного кода строения $^{64200}/_{0}$ в «Универсальной структурной таблице 1» означает, что данный механизм не содержит избыточных связей и является статически определимым (это можно проверить).

Замечание.

При структурном анализе и определении подвижности в курсе ТММ традиционно (с 1869 года ещё от П.Л. Чебышева) рассматриваются структурные схемы условных механизмов без зазоров в кинематических парах их подвижных звеньев, что приводит к выделению (на основе нулевого значения матрицы Якоби) только одного локального особого положения с $W \neq 1$ [5].Это противоречит действительности, так как кинематические пары в шарнирно-рычажных механизмах являются (по определению) подвижными соединениями именно за счет зазоров между элементами пары.

В работе [13] впервые теоретически установлено возникновение в реальных механизмах существенно расширенной *целой области особых положений* γ. Данная область характеризуется повышенной и, главное, неуправляемой подвижностью звеньев – возникающей из-за неизбежных ходовых зазоров в их кинематических парах. В результате выполненной в работе [13] визуализации этих малых зазоров получены размерные и безразмерные формулы для точного расчета этой большой неуправляемой области особых положений – которую теперь следует учитывать и обязательно исключать из рабочей зоны, например, роботов и манипуляторов.

Примечание. В безразмерной зависимости γ ошибочно указан квадрат первого слагаемого в числителе дроби по формуле (6) и в конце [13].

5. Направленный структурный синтез надежно работающих механизмов по условию $D = 0$

Способ № 1. Алгоритм направленного структурного синтеза статически определимых механических систем содержит следующие этапы:

1. Из целочисленных решений структурной математической «VIP-модели» (E) определяются все количественные наборы многошарнирных звеньев $(n_2, n_3, n_4, ..., n_{K+1})$ многозвенных механизмов с заданной подвижностью W и допускаемым числом изменяемых замкнутых контуров K и многократных шарниров ν ($\nu = 0$ или $\nu > 0$).

2. Из полученных наборов многошарнирных звеньев и многократных шарниров (F), определяющих код требуемого строения кинематической цепи без избыточных связей $^{n_2 n_3 n_4 n_5 n_6 ... n_{K+1}}/_{\nu}$, составляется искомая структурная схема синтезируемого механизма.

На рис. 3 представлены алгоритм и результаты направленного структурного синтеза по способу № 1, полученные при решении следующей

практической задачи – «Составить структурную схему передачи вращения от одного двигателя сразу на 4 тяговых колеса, сблокированных с 4-мя параллельными кривошипами, и без применения в приводе зубчатых колёс (входные параметры синтеза – $W=1, K=3, D=0$)». Данная конструкторская задача возникает, например, при создании тягового привода электровозов, многошпиндельных обрабатывающих центров и автоматических линий.

Структурная математическая модель (Е) в этом случае представляет следующую систему линейных алгебраических определяющих уравнений:

$$\left.\begin{array}{l} D=(n_2-n_4)-(W+\nu+3)=(n_2-n_4)-(4+\nu)=0; \\ \tilde{n}=n_2+n_3+n_4=(W+1)+2K=8, \end{array}\right\},$$

имеющих только 4 представленных на рис.3 целочисленных структурных решения данной задачи (что подтверждается стандартными кодами правильного строения трехконтурных восьмизвенных механизмов в «Универсальной структурной таблице 1»).

Способ № 2. Алгоритм направленного структурного синтеза статически определимых механических систем заключается в аналитическом выборе одного из готовых стандартных кодов строения из «Универсальной структурной таблицы 1» и может быть применен как для шарнирно-рычажных, так и для зубчатых механизмов (в последнем случае требуется построение рычажного аналога зубчатого механизма – по схеме на рис. 2).

***** Методика точного аналитического поиска требуемого кода строения механизма (одного из 89 представленных в табл. 1) подробно рассмотрена в работе [14] и была использована при решении обратной конструкторской задачи синтеза планетарных многосателлитных механизмов без избыточных связей. В результате этого впервые теоретически установлено, что статически определимый ($D=0$) планетарный механизм с равномерно нагруженными сателлитами согласно найденному (из таблицы 1) единственно возможному расчётному коду $64200/_0$ должен содержать 3 сателлита ($k_0=3$) и 4-звенную трехповодковую группу Ассура (схема на рис. 2). Алгоритм и результаты структурного синтеза по способу № 2 – сначала 12-звенного шарнирного, а затем искомого планетарного механизмов представлены на рис. 2 и подтверждены [5, с.655] в практике машиностроения повышением в несколько раз срока службы трёхсателлитного статически определимого планетарного механизма. Согласно построенной по стандартному коду строения (из табл.1) структурной схеме на рис.3 рычажный аналог такого трёхсателлитного механизма с плавающей центральной шестерней для исключения избыточных связей должен быть 12-звенным и содержать четырёхзвенную трёхповодковую группу Ассура.

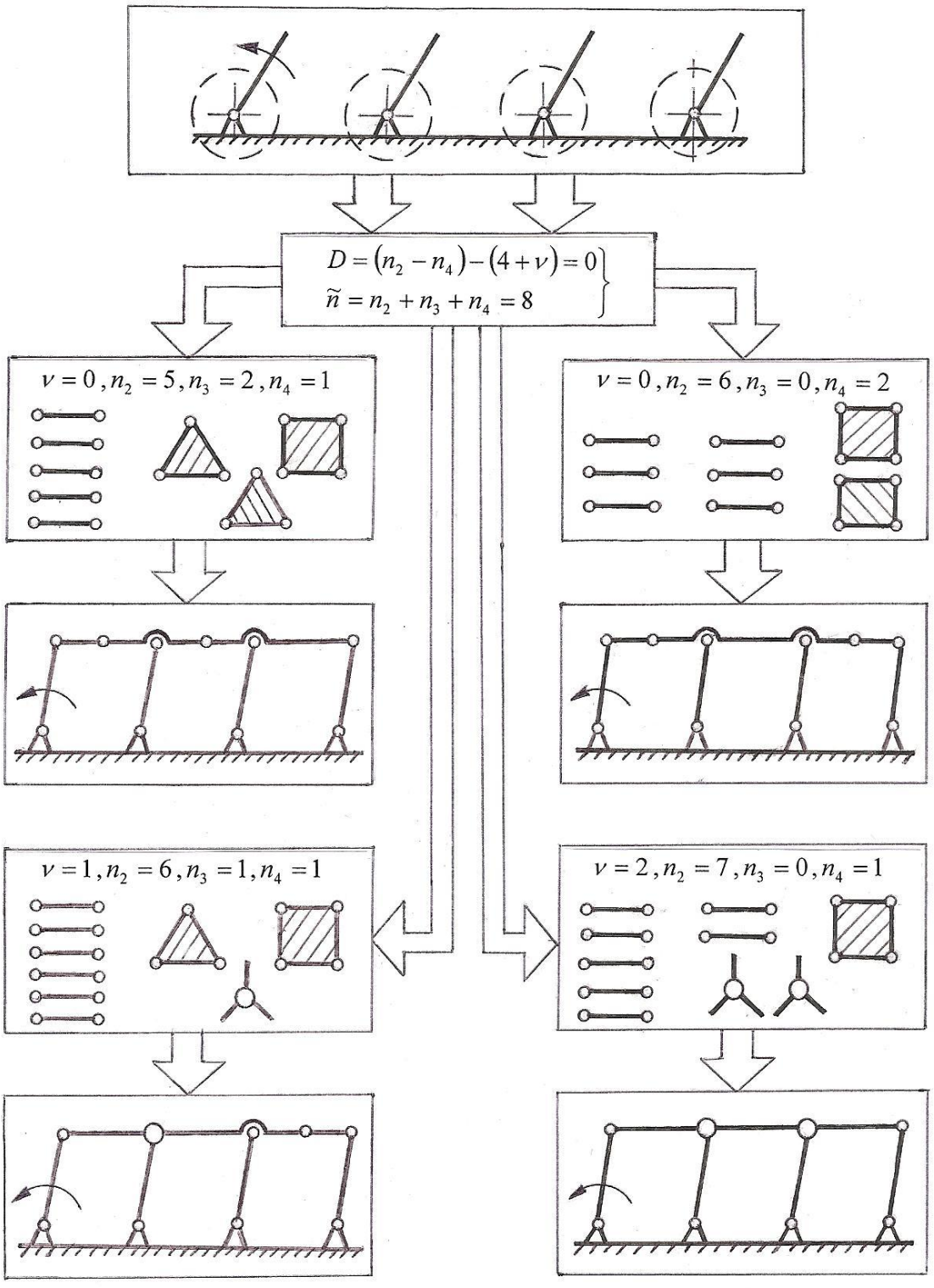


Рис. 3. Направленный структурный синтез трёхконтурного шарнирного механизма параллельных кривошипов по всем 4-м возможным расчётным кодам строения: $^{521}/_{0}$, $^{602}/_{0}$, $^{611}/_{1}$, $^{701}/_{2}$, $(W = 1, K = 3, D = 0)$

Заключение

1. Представленные на основе новой формулы подвижности (A): а) аналитические зависимости (B), (C), (D), (E); б) теоремы о необходимом строении систем без вредных избыточных связей (I), (II), (III), (IV),(V); в) составленная (на основе целочисленных решений математической «VIP-модели») полная «Универсальная структурная таблица расчетных стандартных кодов правильного строения» (см.табл.1) – позволяют реализовать рациональные алгоритмы структурного анализа и структурного синтеза при конструировании многоконтурных статически определимых рычажных и планетарных механизмов с оптимальной целевой функцией $D=0$.

2. Приведенный в данной «Универсальной структурной таблице» абсолютно полный набор расчетных стандартных кодов правильного строения различных одно- и многоконтурных механизмов представляет собой завершённое решение [14], [15] актуальной проблемы: «Создание алгоритма направленного структурного синтеза плоских статически определимых механических систем с многократными шарнирами». Согласно фундаментальному словарю по механике (искусству построения) машин [5] именно такие системы с многократными шарнирами наиболее востребованы в разных областях современного машиностроения.

3. В порядке научной дискуссии о полноте и правильности всего множества представленных в таблице 1 расчетных кодов возможного строения из условия $D=0$ (это стандартные цифровые наборы $n_2n_3n_4n_5n_6/\nu$) на обсуждение предлагается следующее *утверждение:*

***** Среди возможных вариантов строения многозвенных механических систем $(W=1, K\le 5, h=3, H=1)$ не существует (нельзя создать) механизм *без избыточных связей*, структура которого противоречила хотя бы одному из 89 установленных типов структуры (1+3+9+23+53=89) в «Универсальной структурной таблице стандартных кодов» (см. табл. 1).

Примечание. Изданное большим тиражом в ЮУрГУ многоуровневое пособие по ТММ (гриф Минобразования РФ) [3] содержит алгоритмы решения задач по всем разделам базового курса ТММ. Заказы на приобретение пособия (от 1 до 50 экз. отправка почтой) принимаются с банковскими реквизитами по E-mail: s-dek@susu.ac.ru (справ.тел. [351]-775-15-80).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М.З. Коловский, А.Н. Евграфов. О некоторых направлениях модернизации курса ТММ // Теория механизмов и машин. 2003. № 1. С. 3 – 29.
2. В.И. Пожбелко. Новая концепция структуры многоуровневого учебного пособия, адаптированного для самостоятельной работы студен-

тов // Материалы региональной научно-методической конференции «Роль и место самостоятельной работы студентов в образовательном процессе вуза». – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 15-17.
3. В.И. Пожбелко, В.А. Лившиц. Теория механизмов и машин в вопросах и ответах. Многоуровневое компьютеризированное учебное пособие для самостоятельной работы студентов втузов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 439 с.
4. Э.Е. Пейсах, В.А. Нестеров. Система проектирования плоских рычажных механизмов. – М.: Машиностроение, 1988. – 232 с.
5. А.Ф. Крайнев. Механика машин. Фундаментальный словарь. – М.: Машиностроение, 2000. – 904 с.
6. А.И. Смелягин. Структура механизмов и машин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 286 с.
7. Л.Т. Дворников. Вырождаемость и альтернативное применение в технике плоских шарнирных групп Ассура. / Машиностроение, № 20. – Новокузнецк: Изд-во СибГМА, 2010. – С. 5-13.
8. Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-ой Международной научно-практ. конференции / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 846 с.
9. P.L. Ballaney. Theory of Machines. – Delhi: Khanna Publishers, 1992. – 1484 p.
10. W.-M. Hwang, Y.-W. Hwang. Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints. // Mechanism and Machine Theory. – Volume 27, N 2, 1992/ – P. 189-199.
11. В.И. Пожбелко. Единая теория структуры механических систем. // ТММ в вопросах. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – С. 51-106.
12. В.И. Пожбелко. Формализация структурного анализа и синтеза механизмов с кинематическими, гибкими и динамическими связями. // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 11 – С. 3-15.
13. В.И. Пожбелко. Возникновение переменной (изменяемой) структуры и расчёт размеров расширенной области особых положений механизма с учётом зазоров и вырождения кинематических пар. // Теория механизмов и машин. – 2010. – № 2(16). Том 8. – С. 71-80.
14. В.И. Пожбелко. Структурный анализ и синтез плоских механизмов заданного уровня сложности по универсальной структурной таблице стандартных кодов строения. // Теория механизмов и машин. – 2012. – № 1(19).Том 10. – С. 24-45.
15. В.И. Пожбелко. Направленный синтез оптимальных структур плоских механических систем с многократными шарнирами (механизм, фермы, группы Ассура, роботы). Часть 1. // Теория механизмов и машин. – 2012. – № 2(20). Том 10. – С. 77-98.

УДК 621.01

А. В. Степанов

КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА СОСТАВА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ



Александр Васильевич Степанов, к.т.н., доцент
Новокузнецкий институт (филиал)
Кемеровского государственного университета
Россия, Новокузнецк
Тел.: (3843)77-2924, E-mail: stepal@rdtc.ru

Аннотация

В работе рассматриваются методы расчета состава кинематических цепей при заданных значениях общего числа звеньев и их допустимой сложности. На основе анализа современных представлений о параметрах кинематических цепей предлагается новый метод расчета номенклатуры звеньев и пар. Работоспособность метода подтверждается тестированием разработанных компьютерных программ.

Ключевые слова: кинематическая цепь, алгоритм расчета, компьютерная программа.

A.V. Stepanov

COMPUTER METHODS FOR THE CALCULATION OF THE COMPOSITION OF KINEMATIC CHAINS

Dr. prof. Alexander V. Stepanov, Russia, Novokuznetsk, e-mail: stepal@rdtc.ru

Abstract

The paper considers the methods of calculation of the composition of the kinematic chains for given values of the total number of links and their allowable complexity. On the basis of analysis of modern concepts of the parameters of kinematic chains we propose a new method of calculation of the nomenclature of links and pairs. Efficiency of the method is confirmed by the testing of the developed computer programs.

Key words: kinematic chain, algorithm of calculation, computer application

Введение

Создание любой системы начинается с этапа разработки и утверждения ее будущей структуры. Этот этап называют структурным синтезом. Лишь после того, как определена структура механической системы, можно проводить кинетостатическое, динамическое и другие виды исследований

создаваемого механизма.

Структурный синтез механизмов, в свою очередь, распадается на два относительно самостоятельных этапа. На первом этапе определяют состав кинематической цепи с заданными параметрами (находят количества звеньев той или иной сложности и количества кинематических пар, разрешенных к применению классов), а на втором этапе, путем непосредственного соединения звеньев между собой различным образом, получают некоторое многообразие вариантов структурных схем [8].

В данном докладе рассматриваются особенности первого этапа структурного синтеза – расчета состава кинематических цепей при заданном общем числе подвижных звеньев, максимально допустимой их сложности и подвижности цепи.

Краткий обзор

Попытки использования математических зависимостей для расчета номенклатуры звеньев замкнутых кинематических цепей с вращательными парами пятого класса предпринимались около ста лет тому назад [9], однако универсальный математический аппарат для расчета состава кинематических цепей любой сложности был предложен лишь в последнем десятилетии прошлого века профессором Л. Т. Дворниковым [2]. Это система трех уравнений, первое из которых представляет собой развернутую сумму числа кинематических пар цепи, второе – сумму звеньев различной сложности, не превышающей заданную, а третьим уравнением системы является формула В.В. Добровольского.

$$\begin{cases} \sum\limits_{k=m+1}^{5} p_k = \tau + (\tau - 1)\, n_{\tau-1} + \ldots + i\, n_i + \ldots + 2n_2 + n_1 \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \ldots + n_i + \ldots + n_2 + n_1 \\ W = (6 - m)\, n - \sum\limits_{k=m+1}^{5} (k - m)\, p_k \end{cases}$$

Поскольку полученная система оказалась пригодной для описания состава кинематических цепей любой сложности, она была названа универсальной структурной системой (УСС). Как уже отмечалось в [8] особенностью получаемых целочисленных решений универсальной структурной системы является тот факт, что численные значения n_1, n_2, …, n_i, $n_{\tau-1}$ представляют собой количества, так называемых, виртуальных звеньев. Напомним, что виртуальным объектом называют некоторую абстракцию реального объекта, имеющую, по крайне мере, два параметра: имя и назначение. Эти звенья имеют имена n_1, n_2, …, n_i, $n_{\tau-1}$ и назначение – вносить в цепь соответственно 1, 2, …, i, τ-1 пар. В реальные звенья они превращаются лишь в процессе построения структурной схемы [5]. Покажем это на примере.

Если принять общее число звеньев n - равное четырем, подвижность цепи W - равной нулю, максимальную сложность применяемых звеньев τ – равное трем, разрешенный класс кинематических пар – пятый (шарниры), то получим следующее решение: $\tau = 3$, $n_1 = 3$, $p_5 = 6$.

При конструировании структурной схемы строим самое сложное звено цепи – τ-угольник. Оно привносит в цепь три кинематические пары, то есть это – трехпарное звено. Присоединяя к каждой из вершин τ-угольника по одному из звеньев n_1, привносящих в цепь по одной кинематической паре, получим структурную схему, изображенную на рис. 1, а. На этой схеме все звенья n_1 представляют собой двухпарные звенья. Изменим стратегию формирования структурной схемы. Присоединяя к двум вершинам τ-угольника по одному из звеньев n_1 получим фрагмент структурной схемы, изображенный на рис. 1, б. На нем звенья n_1 представляют собой двухпарные звенья. Если оставшимся в наличии звеном n_1 соединить свободные концы двухпарных звеньев, то оно должно быть трехпарным, поскольку должно привнести одну пару в кинематическую цепь, присоединившись к двум выходам построенного ранее фрагмента (рис. 1, в).

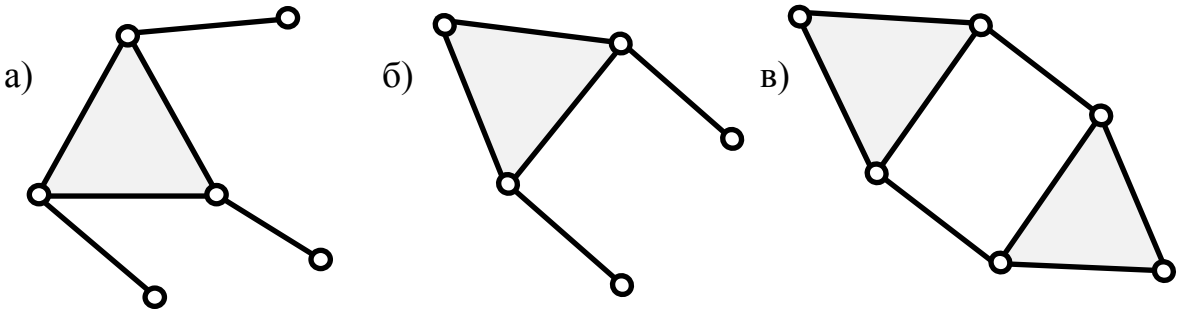


Рис. 1. Различная сборка структур

В этом варианте сборки виртуальные звенья n_1 представлены двумя двухпарными звеньями и одним трехпарным. Технология структурного синтеза механизмов с использованием УСС была показана на примере получения полного состава восьмизвенных плоских рычажных механизмов и опубликована профессором Дворниковым Л.Т. в [3].

Несмотря на то, что в расчетах и в технологии построения структур все четко формализовано и безупречно, применение универсальной структурной системы (УСС) для структурного синтеза механизмов и сама УСС неоднозначно воспринимается специалистами в области теории механизмов и машин, причиной чему является аппарат виртуализации

Постановка задачи

В представляемой далее работе были поставлены следующие, связанные между собой, задачи.

- Используя математический аппарат, разработанный профессором Л.Т. Дворниковым, предложить научному сообществу ме-

тод определения состава кинематических цепей, позволяющий находить числа не виртуальных (в изложенном ранее смысле), а реальных звеньев.

- На основе предлагаемого метода разработать алгоритм определения состава кинематических цепей, пригодный для компьютерной реализации.
- Разработать компьютерные программы, позволяющие подтвердить работоспособность предлагаемого метода.

Построение математической модели

Конструктивно любой механизм состоит из звеньев. С помощью специальным образом обработанных поверхностей (геометрических элементов) звенья соединяются друг с другом, образуя некоторую топологию. Сложность звена определяется числом его геометрических элементов, с помощью которых оно соединяется с другими звеньями. Поскольку графические изображения звеньев цепи представляют собой многоугольники, число сторон любого звена цепи (многоугольника) также равно числу геометрических элементов. В дальнейшем эти понятия будут отождествляться.

Свободные геометрические элементы звеньев являются выходами кинематической цепи. Если к кинематической цепи добавить число геометрических элементов, равное числу ее выходов, то все геометрические элементы звеньев войдут в состав кинематических пар. На этом основании можно получить математическую зависимость, связывающую номенклатуру звеньев цепи с числом кинематических пар.

$$2 \cdot \sum p = \sum_{i=2}^{\tau} i \cdot n_i + vix,$$

где левая часть уравнения представляет собой сумму геометрических элементов кинематических пар, всех разрешенных к применению классов;
сумма в правой части представляет собой сумму геометрических элементов всех звеньев цепи, а *vix* – число выходов кинематической цепи.

Если на полученную зависимость наложить ограничение, состоящее в том, что число геометрических элементов звеньев правой части должно соответствовать числу звеньев, в точности равному значению n, то можно получить систему уравнений следующего вида.

$$\begin{cases} W = (6-m)\,n - \sum_{k=m+1}^{5} (k-m)\,p_k \\ \sum p = (\sum_{i=2}^{\tau} i \cdot n_i + vix)/2 \\ n = \sum_{i=2}^{\tau} n_i \end{cases}$$

Алгоритм решения задачи определения состава кинематических цепей

Вербальное описание алгоритма может быть сформулировано следующим образом.

- Из первого уравнения системы находят общее число связей, накладываемых на систему составом кинематических пар, разрешенных к применению классов, или значение суммы, имеющейся в правой части первого уравнения.
- Имея значение полученной суммы, определяют общее число кинематических пар цепи. Это можно сделать с помощью программного счетчика с переменным основанием системы счисления, описанного, к примеру, в [6]. Сумма разрядов счетчика равна числу кинематических пар. Таким образом, определяется значение суммы, стоящей в левой части второго уравнения системы.
- Имея значение суммы, и задаваясь числом выходов кинематической цепи, с помощью второго программного счетчика находят номенклатуру звеньев, имеющих число геометрических элементов, равное удвоенному числу кинематических пар за вычетом числа выходов цепи, количество которых в точности соответствует значению n.

Если вариантов наборов кинематических пар получилось несколько, то для каждого из наборов производятся действия, описанные во втором и третьем шагах.

Реализация алгоритма

На основе вербального описания алгоритма определения состава кинематических цепей было разработано несколько компьютерных программ, тестирование которых подтвердило работоспособность предлагаемого метода. Разработка программ производилась в интегрированной среде Microsoft Visual Studio 2010 с использованием языка программирования C#. На рисунках 2 и 3 представлены виды рабочего окна программы расчета состава плоских шарнирных систем.

При расчете состава плоских кинематических цепей результаты расчета можно получить относительно быстро. При переходе к пространственным системам для локализации решаемых задач необходимо производить расчеты для отдельных подсемейств.

Решение конкретных задач подтвердило тезис о том, что деление механизмов на семейства оказывается достаточно грубым, особенно это касается механизмов нулевого, первого и второго семейств.

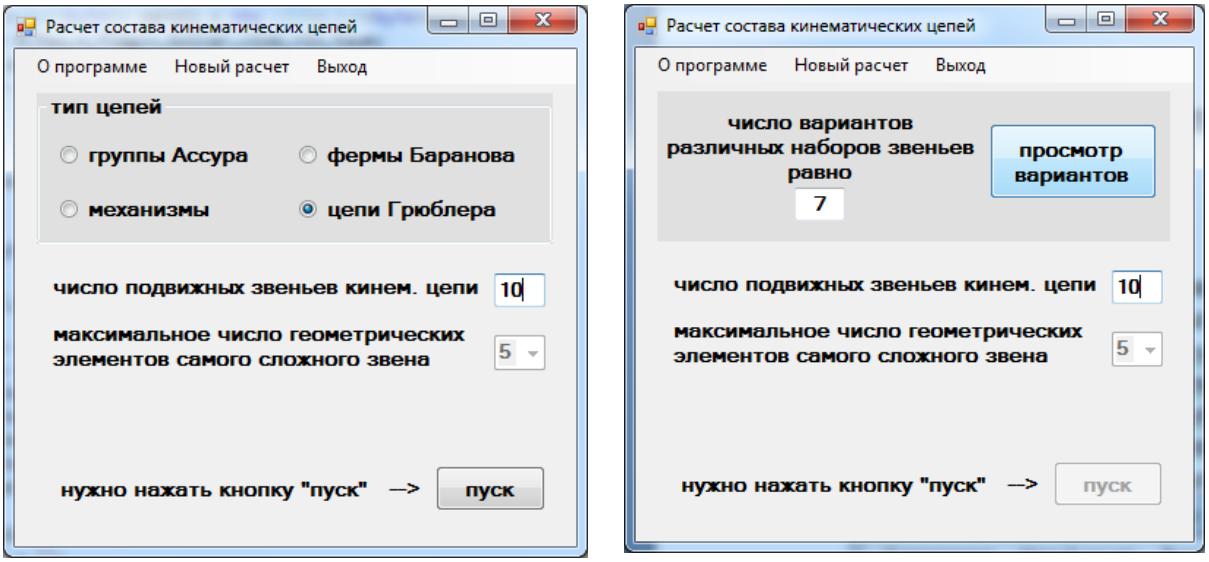
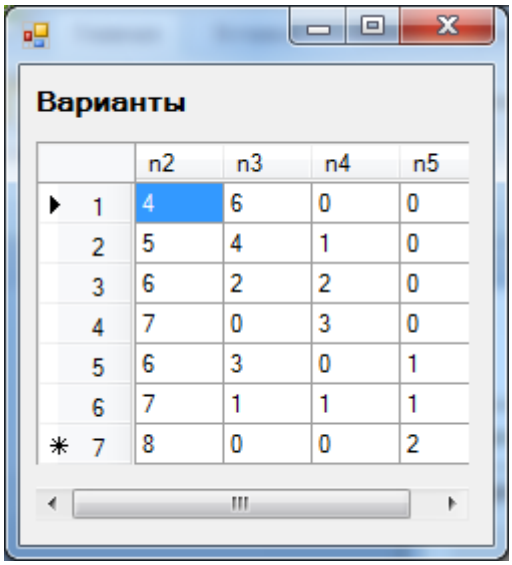


Рис. 2. Виды рабочего окна программы расчета состава плоских кинематических цепей с вращательными парами пятого класса



	n2	n3	n4	n5
1	4	6	0	0
2	5	4	1	0
3	6	2	2	0
4	7	0	3	0
5	6	3	0	1
6	7	1	1	1
7	8	0	0	2

Рис. 3. Окно вывода результатов расчета

Ведь еще академик И.И. Артоболевский высказывал мысль о том, что структурная классификация кинематических цепей не должна заканчиваться делением их на семейства и “представляет собой первый этап структурной классификации современных механизмов” [1]. Техника разбиения механизмов на подсемейства подробно описана в [4].

Использование подсемейств потребовало разработки иного программного интерфейса, а также более продуктивных технологий поиска целочисленных решений. На рис. 4 показано рабочее окно программы для работы с подсемействами.

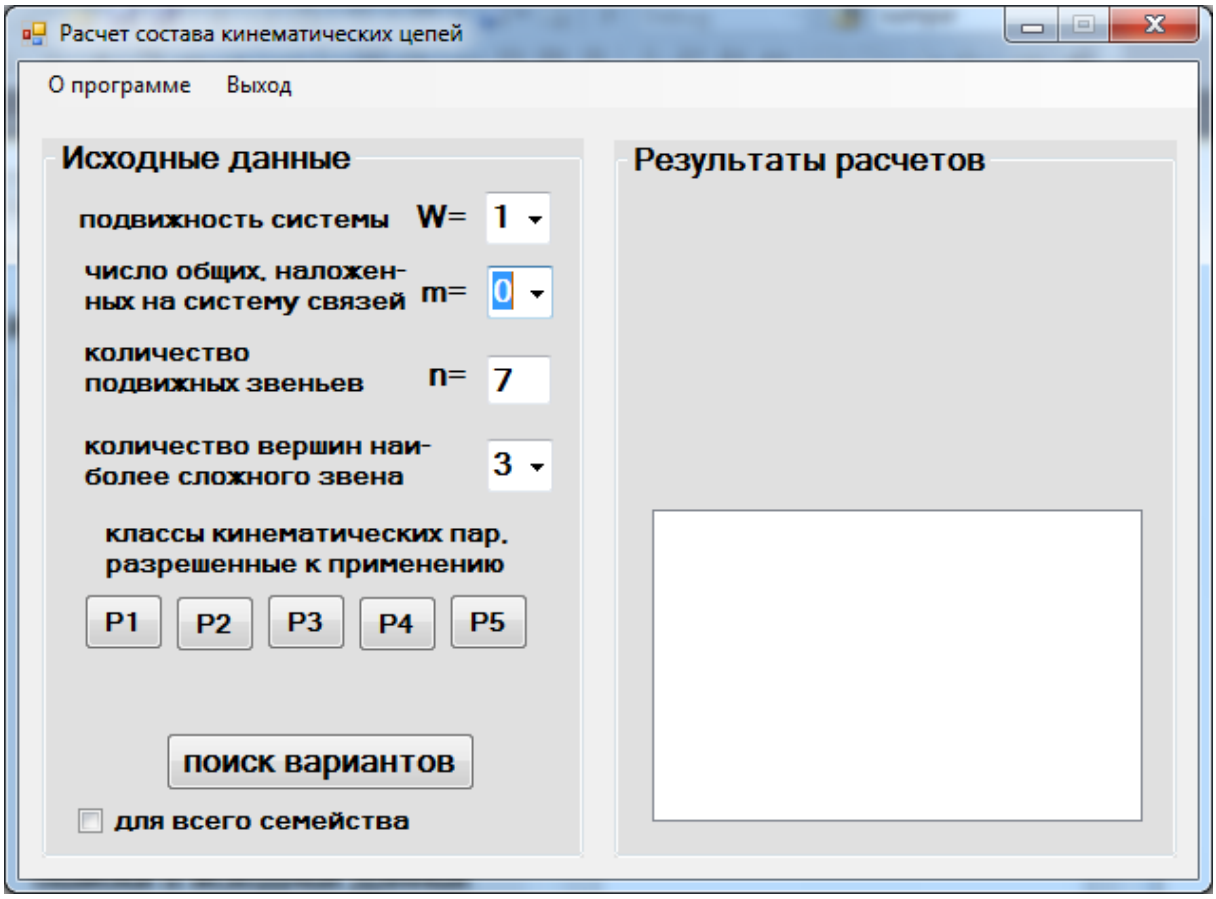


Рис. 4. Рабочее окно программы для работы с подсемействами

При выборе числа общих связей, наложенных на систему, автоматически удаляются соответствующие классы кинематических пар. Из оставшегося набора пар выбираются те, которые соответствуют исследуемому подсемейству.

После того, как получен состав звеньев и кинематических пар, можно приступать ко второму этапу структурного синтеза, - получению многообразия вариантов структурных схем, удовлетворяющих заданному набору требований и ограничений.

Этот этап также может быть реализован с использованием компьютерных средств [10]. Методология формирования полного многообразия вариантов структурных схем плоских шарнирных систем на базе объектно-ориентированной парадигмы описана в [7].

Выводы

Накопленные знания в области структуры механизмов и, в частности, разработки профессора Л.Т. Дворникова, позволяют в настоящее время создавать компьютерные программы для расчета состава кинематических цепей любой сложности. Однако для сокращения времени получения тре-

буемых решений нужны эффективные поисковые процедуры для дискретных пространств и специальные способы организации программ.

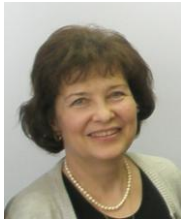
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов. – М.: Наука, 1965. – 776 с.
2. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов. – Новокузнецк: изд-во СибГГМА, 1994. – 102 с.
3. Дворников Л.Т. Опыт структурного синтеза механизмов // Теория механизмов и машин. – 2004. – №2(4). – С. 3-17.
4. Дворников Л.Т., Степанов А.В. К вопросу о классификации механизмов // Известия ТПУ. Математика и механика. Физика. – 2009. – Т.314. – №2. – С. 31-34.
5. Степанов, А.В. Виртуализация в задачах компьютерного синтеза структур механизмов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2007. – № 3(61). – С. 47-50.
6. Степанов, А.В. Решение универсальной структурной системы проф. Л.Т. Дворникова // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2007. – № 3(61). – С. 43-47.
7. Степанов А.В. Объектная парадигма в решении задач структурного синтеза механизмов. // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 846 с. – С. 696-703.
8. Степанов А.В. О современном уровне компьютерного решения задач структурного синтеза механизмов // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 360-369.
9. Grubler M. Gegtriebelehre. Eine Theorie des Zwanglaufes und der ebene Mechanismen. – Berlin: Springer-Verlag, 1917.
10. Hwang W.-M., Hwang Y.-W. Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints. // Mechanism and Machine Theory. –1992. – Vol. 27. – N. 2. – P.189-199.

УДК 681.51

О.П. Томчина, В.В. Резниченко, О.В. Терентьева

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВУХРОТОРНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ КАРДАННЫХ ВАЛОВ



Ольга Петровна Томчина, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, тел, (812)540-0154,
E-mail: otomchina@mail.ru



Виктор Васильевич Резниченко, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, тел, (812)540-0154,
E-mail: 12356788@mail.ru



Ольга Вадимовна Терентьева, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, тел, (812)540-0154,
E-mail: skorpioha@mail.ru.

Аннотация

В работе предложена модель динамики двухроторной вибрационной установки, совершающей колебания в вертикальной плоскости, с учетом угла поворота платформы. В данной модели учтена упругость валов, соединяющих неуравновешенные роторы и двигатели. Рассматривается влияние коэффициентов жесткости и коэффициентов демпфирования валов на прохождение через резонанс и на устойчивость режима частотно-координатной синхронизации в зарезонансной области.

Компьютерное исследование показало, что при параметрах, соответствующих области частот упругих колебаний вала $120 \le \omega_y \le 1000 c^{-1}$, в системе имеет место устойчивый синхронный режим. Более того, упругие карданные валы в двухроторной вибрационной установке позволяют понизить минимальное значение управляющих электромеханических моментов, обеспечивающее прохождение через резонанс, примерно на 10% по сравнению с системой с жесткими валами.

Ключевые слова: многороторные вибрационные установки, эффект Зоммерфельда, частотно-координатная синхронизация.

O.P.Tomchina, V.V.Reznichenko, O.V.Terentieva

DYNAMICS OF TWO-ROTOR VIBRATION UNIT WITH ELASTIC CARDAN SHAFTS

Dr. Olga P. Tomchina[1], e-mail: otomchina@mail.ru;
Dr. Viktor V. Reznichenko[1], e-mail: 12356788@mail.ru;
Olga V. Terentieva[1], e-mail: skorpioha@mail.ru.
[1]St. Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

In the paper a new model for dynamics of two-rotor vibration unit oscillating in vertical plane is proposed. Rotation of the supporting body and flexibility of cardan shafts connecting unbalanced rotors and motors are taken into account. Influence of stiffness and shaft damping coefficients on passing through resonance and stability of frequency-coordinate synchronization in the beyond-resonance zone is analyzed.

It is shown by computer simulation that the system possesses a stable synchronous mode for parameters of flexible shaft corresponding to the frequencies of elastic oscillations satisfying $120 \le \omega_y \le 1000$ s^{-1}. Moreover, flexible cardan shaft in the two-rotor vibration unit allow one to reduce the minimal value of controlling torques required for passage through resonance by 10% compared with the system with stiff shafts.

Keywords: multi-rotor vibration units, Sommerfeld effect, frequency-coordinate synchronization.

В настоящее время вибрационные технологии находят применение во многих отраслях народного хозяйства. При этом наряду с мощными вибрационными установками, предназначенными, например, для грохочения сыпучих материалов в горнодобывающей промышленности, значительный интерес представляют и маломощные вибрационные машины, применяемые в испытательных, измерительных и калибровочных вибростендах и отличающиеся высокими регулировочными свойствами. Широкое применение в таких устройствах находят электромеханические исполнительные системы. Однако при проектировании и исследовании электромеханических систем таких вибрационных установок возникает необходимость приближения исследуемой математической модели к реальному объекту. Поэтому может быть необходим учет упругости карданных валов, соединяющих приводные электродвигатели и неуравновешенные роторы (вибровозбудители).

Одной из важных задач управления вибрационными установками является обеспечение прохождения через зону резонанса при пуске и

разгоне вибровозбудителей, когда область рабочих режимов находится в зарезонансной зоне. Эта задача возникает, если мощность двигателя недостаточна для прохождения через зону резонанса в связи с проявлением эффекта Зоммерфельда, детально изученного в работах [1-4]. Однако именно работа в зарезонансной зоне является более устойчивой с точки зрения обеспечения заданных характеристик рабочего процесса в условиях изменения массоинерционных параметров установки, чем работа на резонансной частоте. Кроме того, современные технологические процессы, связанные с грохочением и вибрационным перемещением сыпучих материалов, требуют высоких скоростей вращения вибровозбудителей. Например, используемый для классификации сыпучих материалов грохот ГИСЛ-62 работает с амплитудой колебаний короба (4,5 ÷ 8) мм и частотой вращения вала вибратора 750 об/мин. Но новые технологические процессы, внедряемые на некоторых предприятиях, требуют перевода этого грохота на режим работы с пониженной амплитудой колебаний короба (до 2 мм) и еще более высокой частотой вращения вала вибратора (до 1500 об/мин) [5].

Второй важной задачей, возникающей при работе многороторных вибрационных установок, является задача обеспечения устойчивого синхронного режима вращения дебалансных роторов, который обеспечивает максимальную производительность виброустановки.

В данной работе рассматривается двухроторной модель, разработанная для исследовательского вибрационного стенда СВ-1 [6], конструкция которого представлена на рис. 1. Здесь указаны следующие основные узлы: 1- приводные электродвигатели; 2 - блоки датчиков; 3 - рама стенда; 4 - роторы вибровозбудителей; 5 - дебалансы; 6 - вибрационный корпус; 7 - пружинные вибровозбудители; 8 - вилки вибровозбудителей; 9 - карданные валы. В работе будет исследоваться влияние параметров этих валов на динамику вибрационного стенда. Расчетная схема вибрационной установки СВ-1 представлена на рис. 2.

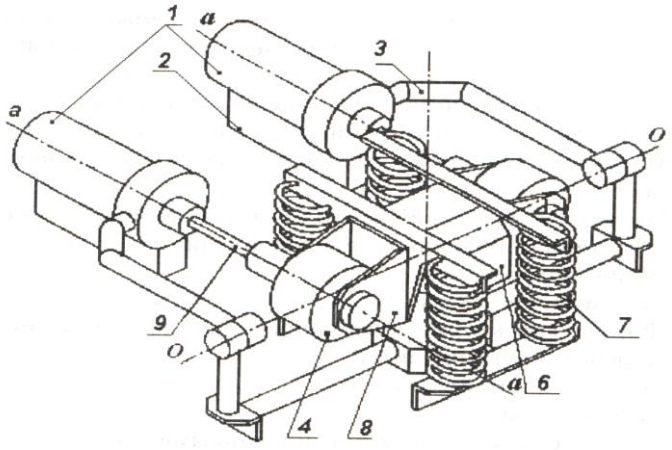


Рис. 1. Конструкция и схема стенда СВ-1.

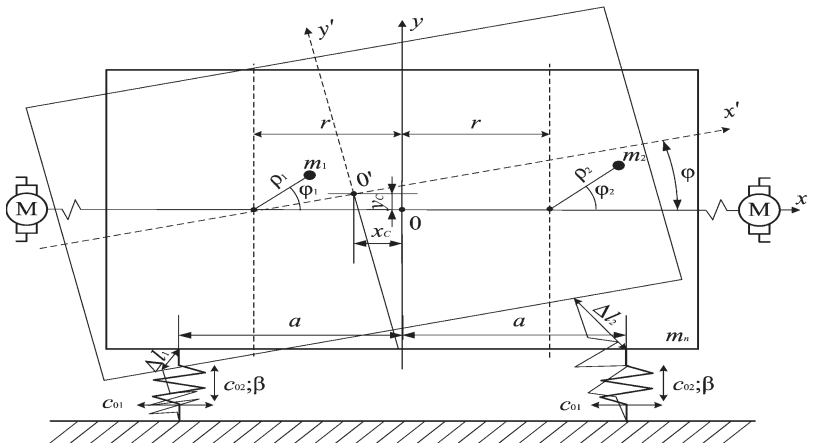


Рис. 2. Расчетная схема двухроторного стенда СВ-1

Здесь использованы следующие обозначения: $m_1 = m_2 = m$; $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ - массы и эксцентриситеты неуравновешенных роторов; x_C, y_C , φ – текущие координаты центра масс и угол поворота платформы; φ_1, φ_2 – углы отклонения дебалансов от горизонтальной оси; c_{0i} – эквивалентная жесткость пружин по горизонтали и вертикали соответственно; r – расстояние между центром масс платформы и точками крепления неуравновешенных роторов; β – коэффициент демпфирования пружин; Δl_i – величина, на которую изменяется длина i-ой пружины в плоскости $0xy$; m_n – масса платформы. Абсциссы точек крепления пружин $x_{ni} = \pm a$.

В работе [7] показано, что при частоте упругих колебаний $\omega_y \geq 1000$ с$^{-1}$ карданный вал можно рассматривать как жесткий, в противном случае необходимо учитывать его упругость. Упругость карданного вала, соединяющего неуравновешенный ротор и двигатель, схематично изображенную на рис. 2, можно учесть в модели, воспользовавшись структурной схемой, изображенной на рис. 3. Здесь введены следующие обозначения: c_B, b_B - коэффициенты жесткости и демпфирования карданного вала; $M_{ci} = k_c \cdot \dot{\varphi}_i$ - момент сопротивления дебаланса,

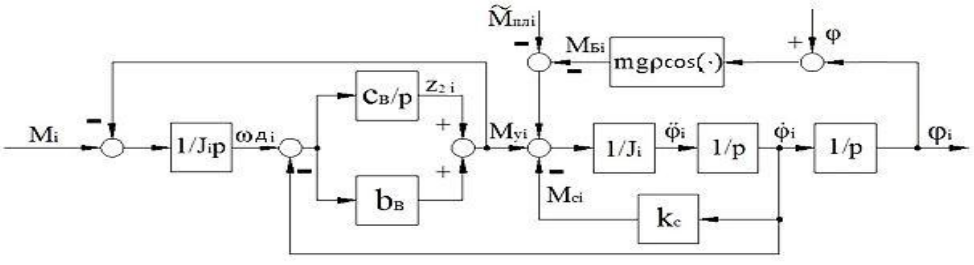


Рис. 3. Схема системы «двигатель-дебаланс» с учетом упругости

обусловленный вязким трением; $M_{Бi}$ - собственный момент дебаланса, $\omega_{Дi}$ - угловая скорость i-го двигателя, $\tilde{M}_{плi}$ - момент, обусловленный

воздействием платформы, M_i – электромеханический момент i-го двигателя i=1,2; ($T_{dB}=\frac{b_B}{c_B}$ - постоянная времени демпфирования); k_c – коэффициент вязкого трения в подшипнике.

Для перехода к уравнениям состояния с учетом упругости, введем переменные состояния $z_{1i}=\omega_{Дi}$ и z_{2i} как выходы соответствующих интеграторов, i=1,2 (рис. 3). Тогда динамика карданного вала с учетом упругости описывается дифференциальными уравнениями:

$$\dot{z}_{1i}=\frac{1}{J_i}(M_i-M_{yi})=\frac{1}{J_i}M_i-\frac{1}{J_i}z_{2i}-\frac{b_B}{J_i}z_{1i}+\frac{b_B}{J_i}\dot{\varphi}_i\,,\qquad \dot{z}_{2i}=c_Bz_{1i}-c_B\dot{\varphi}_i. \tag{1}$$

Опуская индекс «i», запишем упругий момент через координаты z_1 и z_2:

$$M_y=z_2+b_B(\omega_{Дi}-\dot{\varphi})=z_2+b_B(z_1-\dot{\varphi}).$$

Тогда уравнения динамики роторов примут вид:

$$J_i\ddot{\varphi}_i=M_{yi}-M_{Бi}-M_{ci}-\tilde{M}_{плi},\ i=1,2. \tag{2}$$

В работах [8,9] представлены уравнения динамики двухроторной вибрационной установки (рис.2) без учета упругости карданных валов при идентичных и при различающихся по массоинерционным параметрам роторах. При этом формулы для расчета моментов $M_{Бi}$ и $\tilde{M}_{плi}$ остаются для модели с учетом упругости валов как в работе [8] и имеют вид:

$$\begin{aligned}
&M_{Бi}(t)=m\rho g\cos(\varphi+\varphi_i),\\
&\tilde{M}_{пл1}=-(\ddot{x}_cm\rho\sin(\varphi+\varphi_1)-\ddot{y}m\rho\cos(\varphi+\varphi_1)-\ddot{\varphi}(J_1-rm\rho\cos\varphi_1)+\dot{\varphi}^2rm\rho\sin\varphi_1),\\
&\tilde{M}_{пл2}=-(\ddot{x}_cm\rho\sin(\varphi+\varphi_2)-\ddot{y}_cm\rho\cos(\varphi+\varphi_2)-\ddot{\varphi}(J_2+rm\rho\cos\varphi_2)-\dot{\varphi}^2rm\rho\sin\varphi_2).
\end{aligned} \tag{3}$$

Подставляя выражения (3) для моментов $M_{Бi}$, M_{ci} и $\tilde{M}_{плi}$ в (2) и перенеся их в левую часть этих уравнений, получим окончательные уравнения для неуравновешенных роторов.

Тогда динамика двухроторной виброустановки [8] с упругими карданными валами с учетом формул (1)-(3) будет описываться системой дифференциальных уравнений 14-го порядка:

$$\begin{aligned}
&m_0\ddot{x}_c-m\rho[\sin(\varphi+\varphi_1)+\sin(\varphi+\varphi_2)]\ddot{\varphi}-m\rho\sin(\varphi+\varphi_1)\ddot{\varphi}_1-m\rho\sin(\varphi+\varphi_2)\ddot{\varphi}_2-\\
&-m\rho[\cos(\varphi+\varphi_1)+\cos(\varphi+\varphi_2)]\dot{\varphi}^2-m\rho\cos(\varphi+\varphi_1)\dot{\varphi}_1^{\,2}-m\rho\cos(\varphi+\varphi_2)\dot{\varphi}_2^{\,2}-\\
&-2m\rho\cos(\varphi+\varphi_1)\dot{\varphi}\dot{\varphi}_1-2m\rho\cos(\varphi+\varphi_2)\dot{\varphi}\dot{\varphi}_2+\beta\dot{x}_c+2c_{01}x_c=0;
\end{aligned}$$

$$m_0\ddot{y}_c + m\rho[\cos(\varphi+\varphi_1)+\cos(\varphi+\varphi_2)]\ddot{\varphi} + m\rho\cos(\varphi+\varphi_1)\ddot{\varphi}_1 + m\rho\cos(\varphi+\varphi_2)\ddot{\varphi}_2 -$$
$$- m\rho[\sin(\varphi+\varphi_1)+\sin(\varphi+\varphi_2)]\dot{\varphi}^2 - m\rho\sin(\varphi+\varphi_1)\dot{\varphi}_1^{\,2} - m\rho\sin(\varphi+\varphi_2)\dot{\varphi}_2^{\,2} -$$
$$- 2m\rho\sin(\varphi+\varphi_1)\dot{\varphi}\dot{\varphi}_1 - 2m\rho\sin(\varphi+\varphi_2)\dot{\varphi}\dot{\varphi}_2 + m_0 g + 2c_0 y_c + \beta\dot{y}_c = 0;$$

$$- m\rho[\sin(\varphi+\varphi_1)+\sin(\varphi+\varphi_2)]\ddot{x}_c + m\rho[\cos(\varphi+\varphi_1)+\cos(\varphi+\varphi_2)]\ddot{y}_c +$$
$$+ [J + J_1 + J_2 - 2m\rho r(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)]\ddot{\varphi} + [J_1 - mr\rho\cos\varphi_1]\ddot{\varphi}_1 +$$
$$+ [J_2 + mr\rho\cos\varphi_2]\ddot{\varphi}_2 + 2m\rho r\sin\varphi_1\dot{\varphi}\dot{\varphi}_1 - 2m\rho r\sin\varphi_2\dot{\varphi}\dot{\varphi}_2 + mr\rho\sin\varphi_1\dot{\varphi}_1^{\,2} - \quad (4)$$
$$- mr\rho\sin\varphi_2\dot{\varphi}_2^{\,2} + m\rho g[\cos(\varphi+\varphi_1)+\cos(\varphi+\varphi_2)] + c_{03}\varphi + \beta\dot{\varphi} = 0.$$

$$- \ddot{x}_c m\rho\sin(\varphi+\varphi_1) + \ddot{y}_c m\rho\cos(\varphi+\varphi_1) + \ddot{\varphi}(J_1 - rm\rho\cos\varphi_1) + \ddot{\varphi}_1 J_1 - \dot{\varphi}^2 rm\rho\sin\varphi_1 +$$
$$+ m\rho g\cos(\varphi+\varphi_1) + K_c\dot{\varphi}_1 = M_{y1}$$

$$- \ddot{x}_c m\rho\sin(\varphi+\varphi_2) + \ddot{y}_c m\rho\cos(\varphi+\varphi_2) + \ddot{\varphi}(J_2 + rm\rho\cos\varphi_2) + \ddot{\varphi}_2 J_2 + \dot{\varphi}^2 rm\rho\sin\varphi_2 +$$
$$+ m\rho g\cos(\varphi+\varphi_2) + K_c\dot{\varphi}_2 = M_{y2}$$

$$\dot{z}_{11} = \frac{1}{J_1}M_1 - \frac{1}{J_1}(z_{21} + b_B(z_{11} - \dot{\varphi}_1));\ \dot{z}_{21} = c_B z_{11} - c_B\dot{\varphi}_1;$$

$$\dot{z}_{12} = \frac{1}{J_2}M_2 - \frac{1}{J_2}(z_{22} + b_B(z_{12} - \dot{\varphi}_2));\ \ \dot{z}_{22} = c_B z_{12} - c_B\dot{\varphi}_2\ ,$$

где $m_0 = m_n + 2m$.

При анализе динамики системы (4) с упругими валами рассматривалось прохождение через резонанс и устойчивость синхронного режима вращения роторов в зарезонансной зоне при различных c_B, b_B.

Известно, что частотная синхронизация понимается как точное совпадение угловых скоростей несбалансированных роторов $\omega_s = \omega_r$; $s, r = 1,\ldots, k$, то есть [1,6]: $\omega_i = \omega^*$, $(i = 1,\ldots, k)$, где $\omega^* > 0$ – синхронная частота. На практике имеет смысл рассматривать приближенную синхронизацию скоростей (средних скоростей) вибровозбудителей:

$$|\omega_s - \omega_r| \le \varepsilon, \quad (5)$$

где $\varepsilon > 0$ численно может быть выбрано $\varepsilon = 0{,}05\omega^*$. Однако соотношение (5) само по себе недостаточно для синхронизации, поскольку его выполнение не запрещает накопления ошибки синхронизации по фазам (сдвига фаз). В связи с этим возникает необходимость наложить дополнительные требования на обобщенные координаты (фазы) системы.

Координатная синхронизация возникает, когда выходы или некоторые фазовые координаты одной из подсистем вибровозбудителей совпадают с точностью до постоянных величин с соответствующими координатами других подсистем при всех $t \ge t_0$, то есть фазы вибровозбудителей φ_i, $i = 1,\ldots, k$ удовлетворяют тождествам:

$$\varphi_s(t) - \varphi_r(t) = L_{s,r}, \quad s,r=1,...,k. \tag{6}$$

В практических задачах соотношение (6) может выполняться лишь приближенно, т.е. должно быть заменено на выражение

$$\left|\varphi_s(t) - \varphi_r(t) - L_{sr}\right| < \varepsilon_1; \quad s,r=1,...,k \tag{7}$$

Говорят, что в системе имеет место приближенная частотно-координатная синхронизация, если одновременно выполняются соотношения (5) и (7) для некоторых $\varepsilon > 0$, $\varepsilon_1 > 0$ и $L_{sr}=const$ [10]. Далее будем рассматривать именно частотно-координатную синхронизацию.

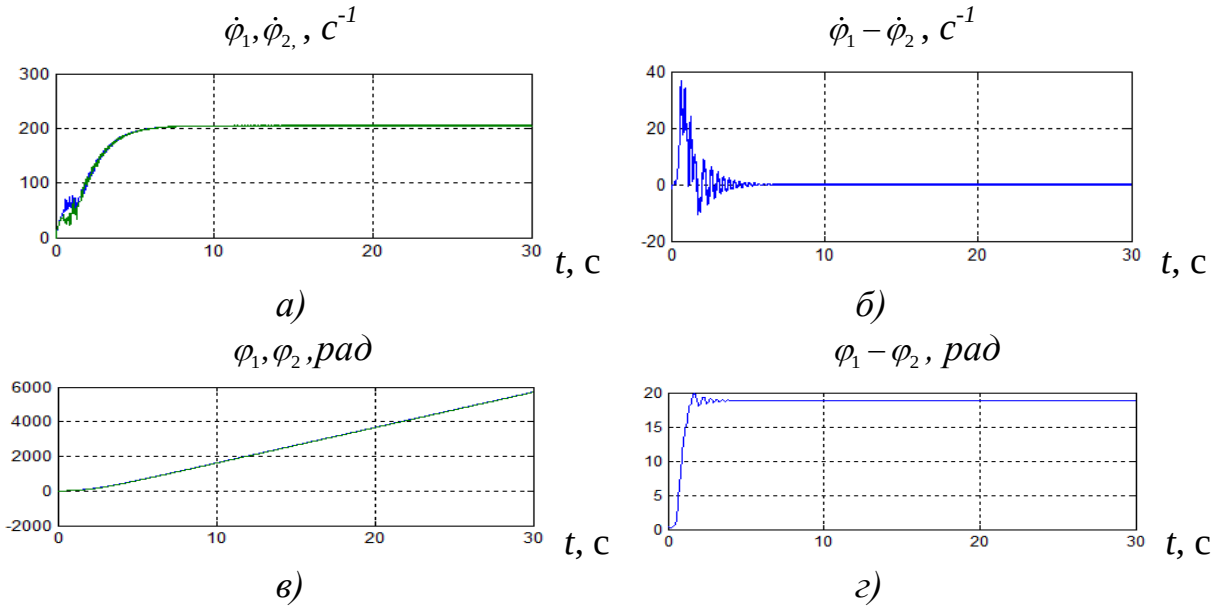


Рис. 4. Динамика системы без учета упругости валов при M_i=2,1 Н·м

На рис. 4 и рис. 5 представлены результаты компьютерного исследования системы, в которой упругость валов не учтена (модель, в которой рассматриваются первые пять уравнений системы (4), а в правых частях 4-го и 5-го уравнений вместо M_{yi} стоят моменты M_i). На рисунках изображены графики: *а)* - скоростей роторов $\dot\varphi_1$, $\dot\varphi_2$; *б)* – их разности $\dot\varphi_1$ - $\dot\varphi_2$; *в)* – фаз φ_1, φ_2; *г)* - разности фаз φ_1- φ_2. Как видно из рисунков при M_i =2,1 Н·м, (рис. 4), скорости $\dot\varphi_1$, $\dot\varphi_2$ выходят в зарезонансную область частот $\dot\varphi_i > \omega_{рез}$ = 30 c^{-1} и в системе имеет место синхронный режим, на что указывают приближенная стабилизация разности фаз $\left|\varphi_1(t) - \varphi_2(t) - L_{1,2}\right| \le \varepsilon$ ($L_{1,2} \approx$ 18,2 рад), и стремление к нулю разности скоростей (график *б*). Однако, при уменьшении значения управляющих моментов (рис. 5, где M_i =2 Н·м) наблюдается эффект Зоммерфельда, при котором средняя скорость одного из роторов «застряла» на частоте резонанса $\dot\varphi_{1ср} = \omega_{рез} =$

30 с$^{-1}$, и отсутствует синхронизация роторов. Второй ротор также не выходит на заданный скоростной режим (т.к. $\dot{\varphi}_2$ <200 с$^{-1}$).

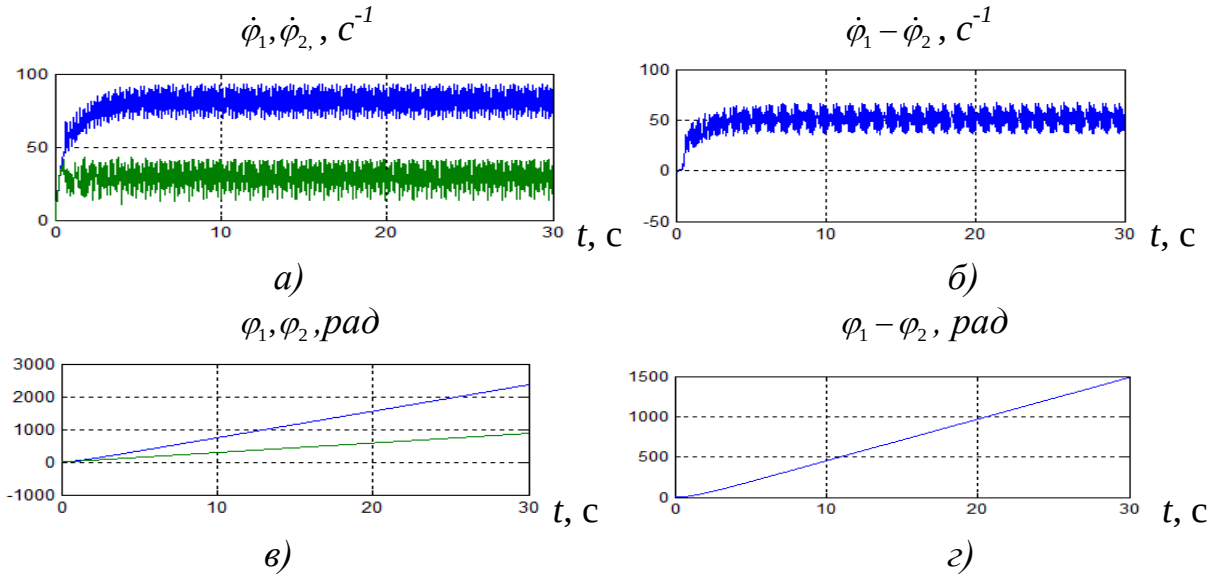


Рис. 5. Динамика системы без учета упругости валов при M_i =2 Н·м

На рис. 6 и рис. 7 представлены результаты исследования для системы (4), в которой упругость валов учтена. Как видно из графиков, упругие карданные валы в двухроторной виброустановке позволяют понизить минимальное значение моментов M_i, обеспечивающее прохождение через резонанс, на 10% по сравнению с системой с жесткими карданными валами, что видно из рис. 6, соответствующего значениям M_i =1,95 Н·м.

Исследование влияния упругости вала на динамику системы (4) проводилось при варьировании параметров в следующих пределах: $100 \le c_B \le 3000$[Н·м/рад]; $0{,}05 \le b_B \le 0{,}5$ [Н·м·с], что соответствует диапазону частот упругих колебаний вала $120 \le \omega_y \le 1000$ с$^{-1}$. На рис. 9 изображена область допустимых значений параметров c_B и b_B (выделена на рисунке цветом), при которых система (4) сохраняет работоспособность. Качество переходных процессов для скоростей и разности фаз для параметров из указанной области практически одинаково и соответствует графикам, представленным на рис. 6. Для малых частот упругих колебаний

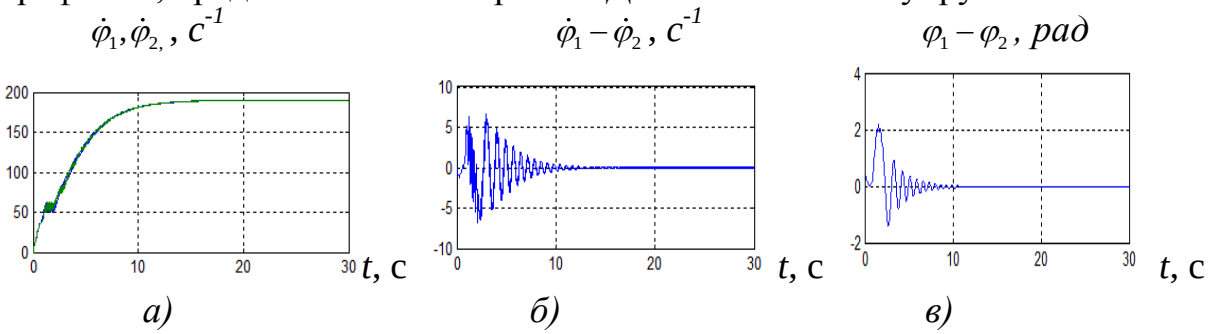
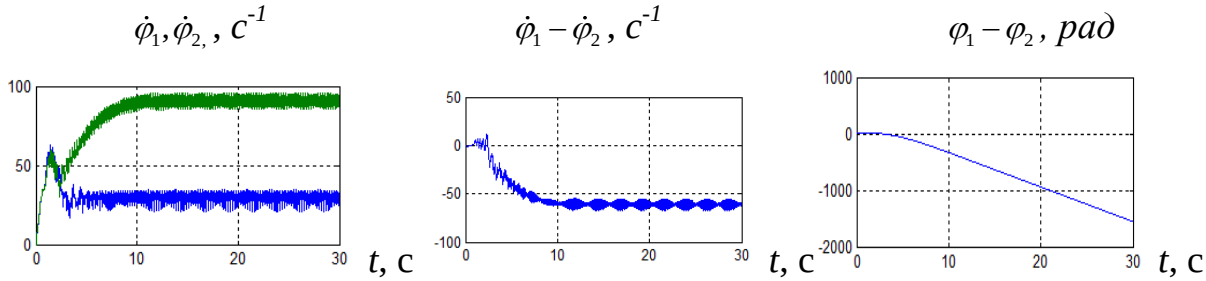
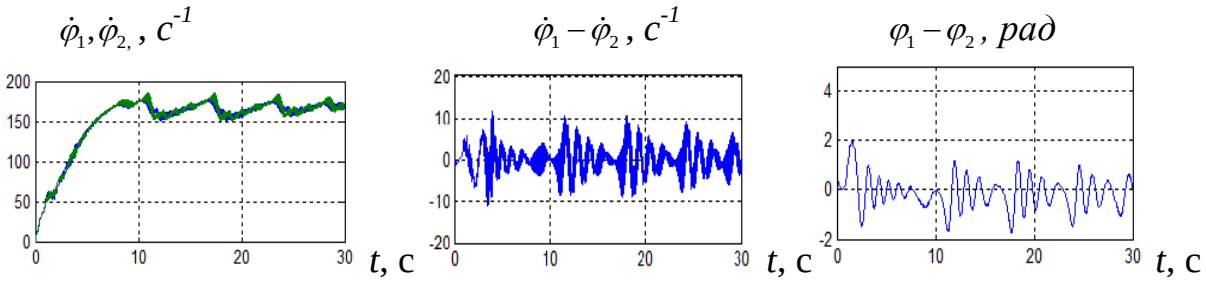


Рис. 6. Динамика системы (4)с учетом упругости валов при M_i =1,95Н·м; c_B = 3000 Н·м/рад, b_B = 0,5 Н·м·с.



а) *б)* *в)*

Рис. 7. Динамика системы с учетом упругости валов при M_i =1,9 Н·м; c_B = 3000 Н·м/ рад, b_B = 0,5 Н·м·с.



а) *б)* *в)*

Рис. 8. Динамика системы (4) при c_B = 300 Н·м/ рад, b_B = 0,1 Н·м·с.

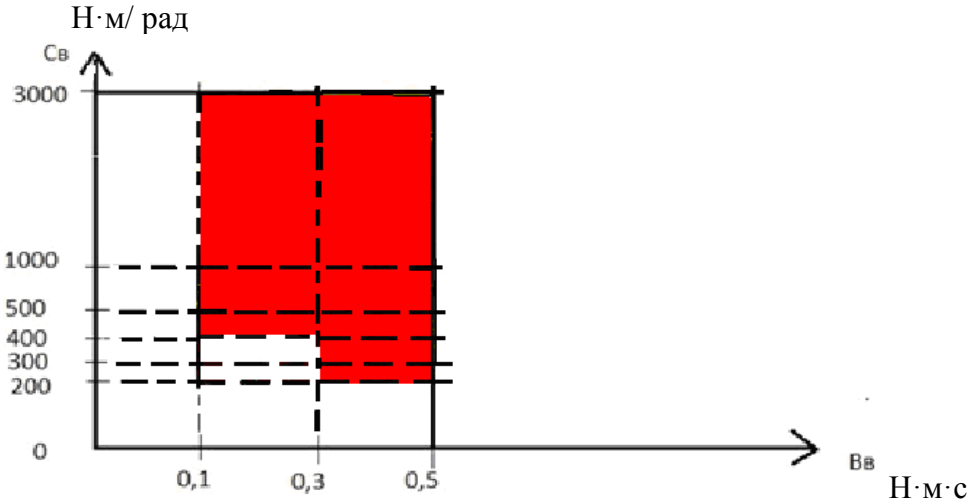


Рис.9. Область допустимых значений параметров упругих валов.

вала ($\omega_y \leq 120$ с$^{-1}$) при «проходном» моменте M_i =1,95Н·м качество процессов резко ухудшается (рис. 8), наблюдаются значительные биения скорости и недопустимо большие значения упругих моментов M_{y1}, M_{y2}.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блехман И.И. Вибрационная механика. - М.: Физматлит, 1994.- 400 с.

2. А.В. Печенев. О движении колебательной системы с ограниченным возбуждением вблизи резонанса // ДАН СССР. – 1986. – Т.290. – №1. - С. 12–15.
3. Д.А. Томчин, А.Л. Фрадков. Управление прохождением ротора через зону резонанса на основе метода скоростного градиента // Проблемы машиностроения и надежность машин. – 2005. - №5. - С. 66-71.
4. A.L. Fradkov, O.P. Tomchina, D.A. Tomchin. Controlled passage through resonance in mechanical systems // Journal of Sound and Vibration. – 2011. - Vol.330. - № 6. – P. 1065-1073.
5. Модернизация грохота с элементами динамического синтеза / Дьяконова В.Я. [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2012. - № 9. – С. 88-91.
6. Управление мехатронными вибрационными установками / Б.Р.Андриевский [и др.]; под ред. И.И. Блехмана и А.Л. Фрадкова. - СПб.: Наука, 2001. – 278 с.
7. Шестаков В.М., Епишкин А.Е. Динамика автоматизированных электромеханических систем вибрационных установок. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 94 с.
8. В.А. Галицкая, О.П. Томчина. Пропорционально-интегральный энергоскоростной алгоритм управления кратной синхронизацией роторов вибрационной установки // Информатика и системы управления. - 2012. - №3 (33). – С. 158-168.
9. О.П. Томчина, Д.А. Томчин, Д.В. Горлатов. Алгоритм управления кратной синхронизацией для виброустановки с роторами, имеющими разные массоинерционные характеристики // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 752-762.
10. Интегро - дифференцирующие алгоритмы скоростного градиента в задачах кратной синхронизации вибрационных установок / Фрадков А.Л., Томчина О.П. [и др.] // Научно-технический вестник ИТМО. – 2013. - №1. – С. 30-37.

МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771.67.

П.В. Кононов, В.Н.Востров

АНАЛИЗ ТЕКСТУРЫ ЗАГОТОВОК С РАСКАТАННЫМ ФЛАНЦЕМ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ



Павел Васильевич Кононов, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. 8 (952) 398 05 84, E-mail: KPV710@Rambler.ru



Владимир Николаевич Востров, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. 8 (911) 945 83 31, E-mail: vostrov-vn@mail.ru

Аннотация

В работе представлены исследования и анализ методом дифракции рентгеновских лучей текстуры заготовок с раскатанным фланцем на образующей части трубчатых заготовок. Эксперименты показали удовлетворительное качество изделий, что подтверждает эффективность разработанной технологии.

Ключевые слова: технология, ротационное пластическое деформирование, фланец, заготовка, текстура, рентгеновские лучи.

P.V. Cononov, V. N. Vostrov

THE ANALYSIS OF A STRUCTURE OF PREPARATIONS WITH THE UNROLLED FLANGE A METHOD OF DIFFRACTION OF X-RAYS

Pavel V. Cononov[1], e-mail: KPV710@Rambler.ru;
Dr. prof. Vladimir N. Vostrov[1], E-mail: vostrov-vn@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

In work researches by a method of diffraction of X-rays of a structure of preparations with the unrolled flange on a forming part of tubular preparations

are submitted. Experiments have shown satisfactory quality of products that confirms efficiency of the developed technology

Key words: technology, rotational plastic deformation, cylindrical preparation, structure, X-rays.

Целью данной работы является оценка качества изделий с фланцами формоообразованными раскаткой образующей части заготовок, для прогнозирования их надежности в процессе эксплуатации.

Детали с фланцами, значительно удаленными от торца, находят широкое применение в машиностроении. Разработанная технология раскатки фланцев на образующей части трубчатой заготовки расширяет технологические возможности процессов объемного формообразования фланцев: поперечно–клиновой прокаткой, выдавливанием, торцовой раскаткой и др. [1].

Исследования параметров структуры (текстурированность K_T и ширина дифракционной линии на полувысоте пика дифракционного максимума *FWHM*) поверхностных слоев раскатанных деталей с фланцем выполнены с применением дифрактометра *XSTRESS* 3000 *G*3*R* с $\chi-$модифицированным гониометром [2]. В эксперименте использовались детали из медного сплава Л63. Для данного материала, метод позволяет определить состояние структуры поверхностных слоев глубиной до 20 мкм.

Дифрактометр имеет укороченную дугу гониометра, два полупроводниковых детектора, установленных на гониометре под углом 180 градусов (т.е. исследования ведутся одновременно в двух направлениях $\varphi = 0^0$ и $\varphi = 180^0$), две оси вращения и возможность выполнения незначительных осцилляций в направлениях вращения. Углы наклона гониометра составляют $\chi = \pm 40^0$, осцилляция – $\Delta\chi = \pm 4^0$.

Максимальному значению угла наклона χ гониометра соответствует минимальное значение эффективной глубины проникновения рентгеновских лучей $H_{Z\min}$. На дифрактометре *XSTRESS* 3000 *G*3*R* детекторы *A* и *B* расположены под углом 180^0, что позволяет одновременно исследовать два направления $\varphi = 0^0$ и $\varphi = 180^0$.

На рис 1 представлена деталь с раскатанными фланцем и ступицей из латуни Л63. Обозначения областей поверхности раскатанной детали, в которых исследовалось структурное состояние показаны на рис. 1: 1, 2 – цилиндрическая поверхность раскатанной ступицы; 3 – цилиндрическая поверхность раскатанного фланца; 4 – участок недеформированный (после токарной обработки): g – торцевая поверхность раскатанного фланца; B – торцевая поверхность раскатанной ступицы. Во всех исследуемых областях выбраны следующие направления измерения: *X* – тангенциальное, *Y* – осевое, *Z* – радиальное.

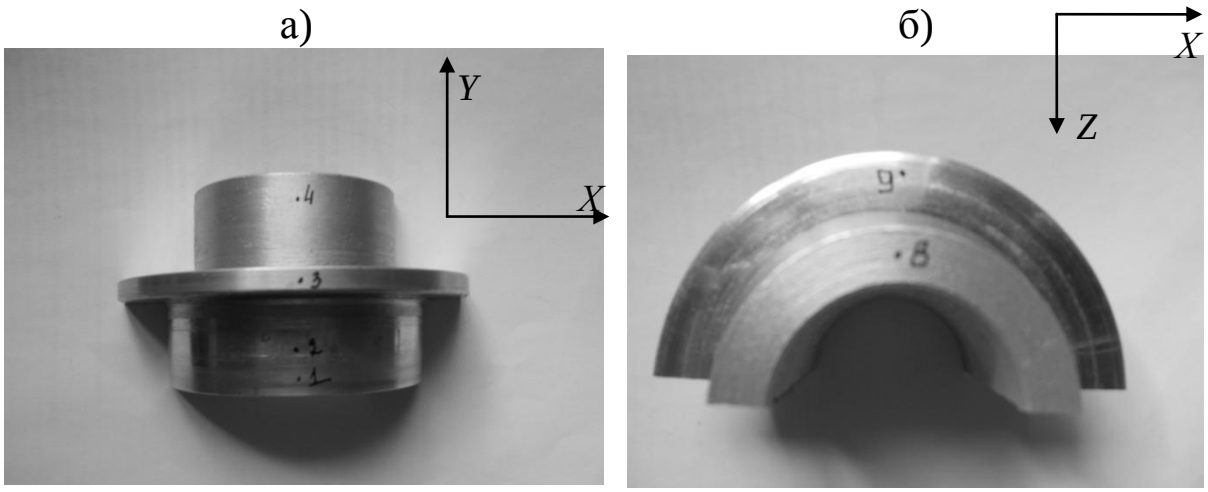


Рис. 1. Нумерация областей на раскатанных деталях из латуни Л63, в которых исследовалась структура поверхностных слоев.
а) Деталь в координатах *X* и *Y*; б) Деталь в координатах *X* и *Z*.

В табл. 1 представлены режимы рентгеносъемок при неразрушающем анализе параметров структурного состояния деталей с фланцем из сплава Л63 с использованием рентгеновских трубок с различной длиной волны излучения.

Таблица 1

Параметры рентгеносъемки раскатанной детали с фланцем из сплава Л63

Режим рентгено - съемки	Излучение	λ, нм	фаза	(*hkl*)	2θ, град	μ, 1/мм	H_Z (при $\psi = 0^0$), мкм	H_Z (при $\psi = 40^0$), мкм
№1	$Cu - K_\alpha$	0,154184	α - твердый раствор цинка в меди	420	141,2	43	10,7	8,2
№2				331	134,1		10,3	7,9
№3	$Mn - K_\alpha$	0,210314		311	145,7	105	4,5	3,5
№4	$Cr - K_\alpha$	0,229100		220	124,9	134	3,1	2,4

В табл. 1 обозначены: λ – длина волны излучения, μ – линейный коэффициент ослабления рентгеновских лучей в сплавах, H_Z – эффективная глубина проникновения рентгеновских лучей; 2θ – угол дифракции (угол Вульфа–Брегга); ψ – угол между нормалями к поверхности образца и к отражающей плоскости (*hkl*) (обозначение (*hkl*) – индексы Миллера).

При расчете параметров дифракционной линии использовали угол дифракции 2θ (угол Вульфа – Брегга) [3]:

$$2\theta = \beta_B - (k\, a_1), \quad (1)$$

где β_B – верхний предел диапазона углов дифракции 2θ, установленный во время калибровки; k – коэффициент перевода координаты шкалы линейного позиционно–чувствительного детектора на углы 2θ, a_1 – центр дифракционной линии.

На графике рис. 2 показаны рентгеновские спектры деталей из сплава Л63 в исследуемых точках. Буквой I обозначена интенсивность дифракционной линии в относительных единицах.

В процессе рентгеносъемки, использование в процессе осцилляции углов наклона χ гониометра по 7 положительных и отрицательных значений углов, а также различных отражающих плоскостей (hkl), позволило уменьшить влияние текстуры на точность определения угла дифракции 2θ.

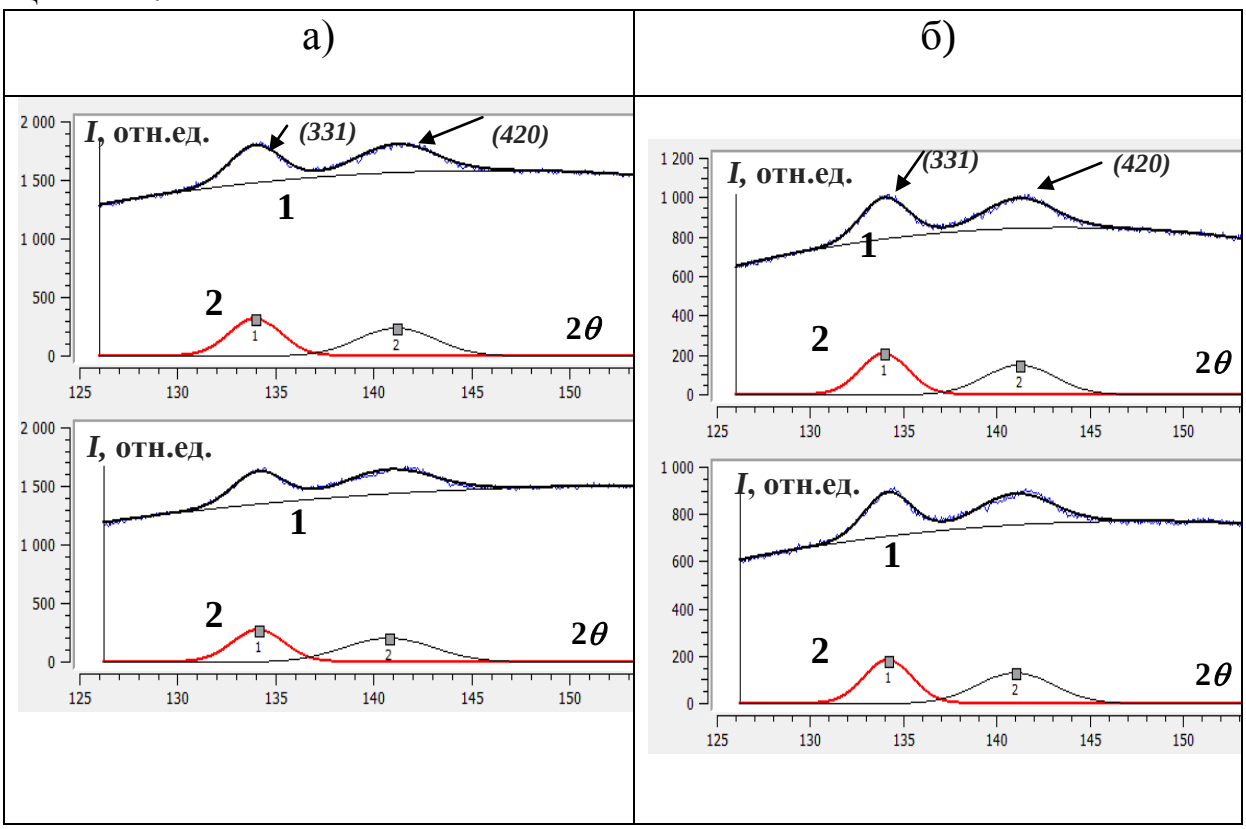


Рис. 2. Экспериментальные 1 и расчетные 2 (функция Пирсона VII) рентгенограммы детали с фланцем из сплава Л63 в области измерения 3 в направлении измерения X при режимах рентгеносъемки №1 (дифракционный максимум соответствует отражающей плоскости 420) и №2 (дифракционный максимум соответствует отражающей плоскости 331)
а) исследования без β – фильтра из Ni; б) с β – фильтром из Ni.

На рис. 2 кривая 1 соответствует экспериментальным значениям, а кривая 2 – расчетным значениям (функция Пирсона VII). Верхний график соответствует углу расположения детектора $\varphi = 0^0$, а нижний – $\varphi = 180^0$.

Условная величина текстурированности, методом дифракции рентгеновских лучей, оценивалась с помощью параметра текстурированности K_T:

$$K_T = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}, \qquad (2)$$

где $I_{\max}$ – максимальная интенсивность дифракционной линии при используемых углах наклона гониометра χ; $I_{\min}$ – минимальная интенсивность дифракционной линии при углах наклона χ.

Для оценки структурного состояние материала детали, кроме параметра текстурированности K_T, используется ширина дифракционной линии на полувысоте пика дифракционного максимума *FWHM* [3]. Значения параметров *FWHM* в характерных областях детали с раскатанным фланцем из сплава Л63 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметров *FWHM* и K_T структурного состояния материала детали с раскатанным фланцем из сплава Л63 при двух режимах рентгеносъемки

Номер области измерения	Направление измерения	Режим рентгеносъемки № 1		Режим рентгеносъемки №2	
		FWHM	K_T	*FWHM*	K_T
1	*X* *Y*	4,13 4,09	1,5 1,4	2,46 2,44	1,6 1,5
2	*X* *Y*	4,10 4,08	1,5 1,4	2,45 2,43	1,6 1,5
3	*X* *Y*	4,78 4,76	2,1 1,9	3,16 3,07	2,0 1,9
g	*X* *Z*	4,51 4,38	1,7 1,6	2,68 2,66	1,7 1,7
B	*X* *Z*	4,08 4,07	1,4 1,4	2,39 2,32	1,4 1,3

Параметр *FWHM* косвенно характеризует структурное состояние материала, поскольку с ростом *FWHM* увеличивается микротвердость материала. Применение параметра *FWHM,* для оценки уровня микротвердости, позволяет неразрущающим способом провести приближенную оценку величины микротвердости в области поверхности деформированной детали.

Из табл. 2 следует, что величина параметра *FWHM* в исследуемых областях детали в направлениях измерения изменяется незначительно. Наибольшие значения параметра *FWHM* наблюдаются в области измерения 3, расположенной на цилиндрической поверхности фланца раскатанной детали.

Наибольшая величина параметра текстурированности K_T имеет место также на цилиндрической поверхности раскатанного фланца (в области 3). Параметры текстурированности K_T всех рассмотренных поверхностей детали в тангенциальном направлении (по оси *X*) больше, чем в осевом направлении (по оси *Y*) и радиальном (по оси *Z*). Данная кристаллографическая ориентация является особенностью исследуемого процесса объемного формообразования раскаткой фланца и ступицы детали.

Анализ структурного состояния деталей с раскатанным фланцем показал, что разработанная технология улучшила механические свойства изделия за счет сформированной текстуры материала,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П.В. Кононов, В.Н. Востров. Формообразование фланцев деформированием образующей части трубчатых заготовок // Современное машиностроение наука и образование: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / Под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.– С. 391-396.
2. В.Н. Востров, Н.А. Яблокова, П.В. Кононов. Исследование методом дифракции рентгеновских лучей остаточных напряжений в деталях с раскатанным фланцем из сплава Л63 // Металлообработка. – 2012. - № 4(70). – С. 38-42.
3. SAE J784. Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction [Text] // Second edition, Chapter 7.3, 2003. – 61 p.

УДК 621.77.04

С.Н. Кункин, Л.Б. Аксенов

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАСКАТКОЙ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ



Сергей Николаевич Кункин, к.т.н., заведующий кафедрой,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Россия. Тел. (812) 552-9530 E-mail: kunkin@spbstu.ru



Леонид Борисович Аксенов, д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия. Тел. +7 921 931 6786, E-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru

Аннотация

Использование локальных методов деформирования металлов позволяет расширить возможности технологических процессов при меньшей мощности оборудования.
Ключевые слова: раскатка, деформирование металла, обжатие.

S.N. Kunkin, L.B. Aksenov

MANUFACTURING TECHNIQUES ROTARY FORGING AXISYMMETRIC DETAILS WITH THE FLANGE

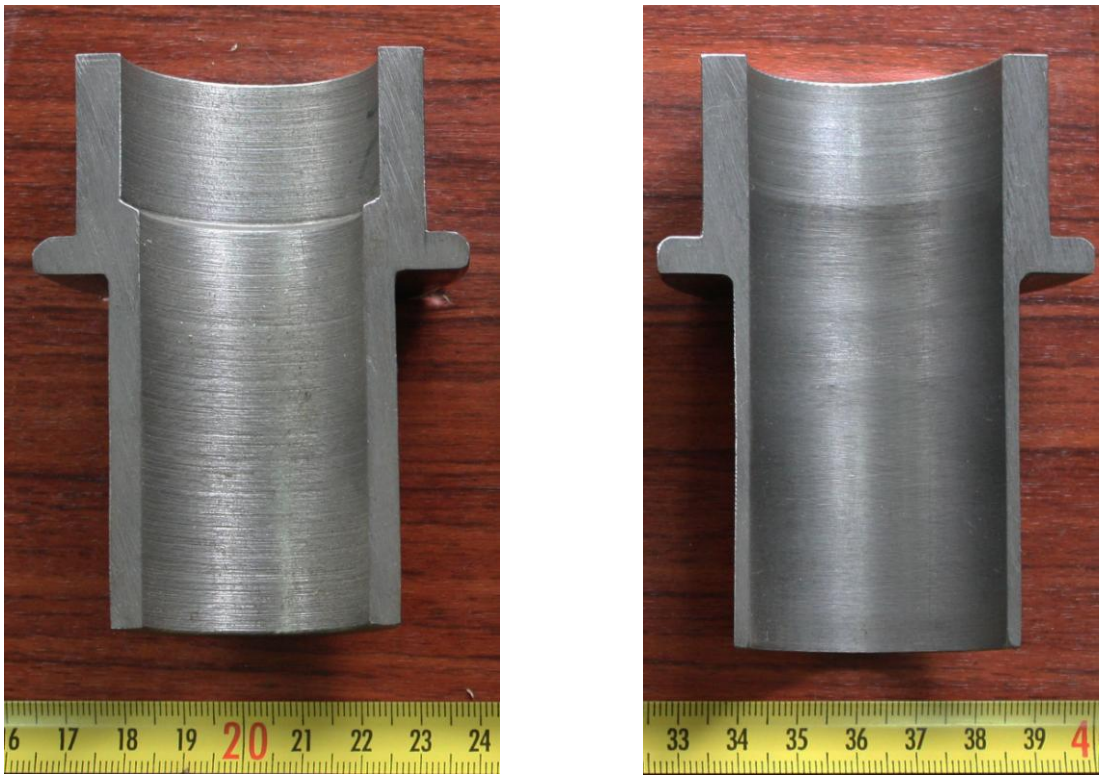
Sergey N. Kunkin[1], e-mail: kunkin@spbstu.ru;
Leonid B. Aksenov[1], e-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

Local methods of deformation of metals expand possibilities of technological processes with lower capacity of the equipment.

В машиностроительной отрасли при производстве различных изделий широко используются осесимметричные детали с фланцами, расположенными на некотором расстоянии от торца детали (рис. 1).

Технологические процессы изготовления деталей данного типа весьма разнообразны и зависят от соотношения основных размеров и используемой марки стали.



а) б)

Рис. 1. Детали с фланцем
а) с поднутрением; б) без поднутрения

Одним из таких процессов является технологический процесс радиального выдавливания трубной заготовки в горячем состоянии. Широко используются технологии горячей объемной штамповки на прессах и горизонтально-ковочных машинах. В большинстве случаев коэффициент использования металла является низким, а изготовленные поковки требуют большого объема механической обработки [1, 2].

В данной работе экспериментально исследовалась возможность изготовления осесимметричных полых деталей с наружным фланцем. Инструментальная оснастка для раскатки была спроектирована и изготовлена для раскатной машины горизонтального типа, имеющейся на кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» (рис. 2).

Раскатка производилась на лабораторной установке для торцовой раскатки со следующими основными технологическими параметрами:

Угол наклона конического валка - 10 градусов

Скорость вращения шпинделя машины - 130 5об/мин.

Максимальное усилие раскатки - до 280 KN

Подача конического валка - 0.3 мм/об (в начале процесса раскатки) и около 0,05 мм/об. (в конце раскатки)

Смазка - индустриальное масло

Время раскатки (формовочное время) - 20-25 секунд

Раскатка деталей с поднутрением.

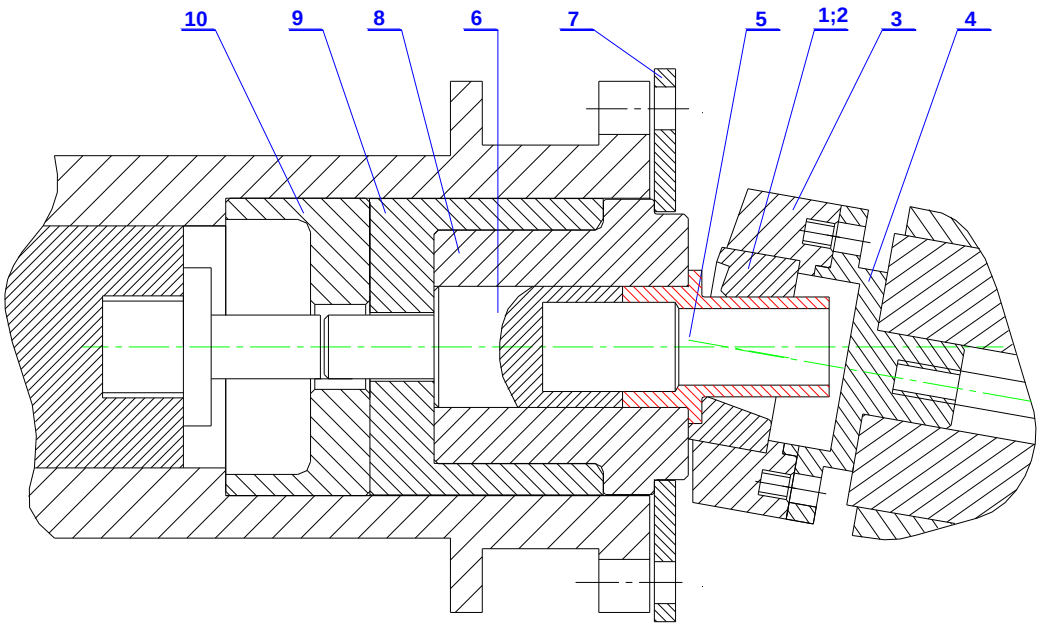


Рис. 2. Эскиз комплекта инструментальной оснастки для раскатки детали
1, 2 – конические валки для первой и второй операции; 3 - корпус валка;
4 – основание; 5 – внутренняя оправка; 6 – выталкиватель; 7 – крышка;
8 – матрица; 9, 10 – опорные стаканы.

Раскатка деталей с поднутрением

В качестве заготовки использовалась механически обработанная труба из стали 20 ГОСТ 1050 – 88. Наружный диаметр трубной заготовки составлял ∅56,9 мм, внутренний ∅ 42,1 мм. Опытным путем установлено, что для стабильного входа раскатного валка на первой операции, заготовка должна иметь заходную часть длиной 15 мм. Исходная твердость стали 20 перед раскаткой была HV 140... 145. Эскиз предварительно обработанной трубной заготовки для первой операции и последующие технологические переходы представлены на рис. 3

Проведенные эксперименты выявили следующие недостатки формоизменения:

1. Первая операция раскатки не обеспечивает требуемую форму внутренней фаски между диаметрами 42 и 37 мм. Для лучшего заполнения данной зоны необходимо выполнять предварительные операции по радиальному обжатию данной зоны заготовки или получать фаску другими способами. Деформированное состояние после первой операции и заусенец между заготовкой и оправкой не обеспечивают требуемого ресурса пластичности в данной зоне. Именно поэтому трещины появляются на второй операции раскатки на наружном диаметре фланца 72 мм.

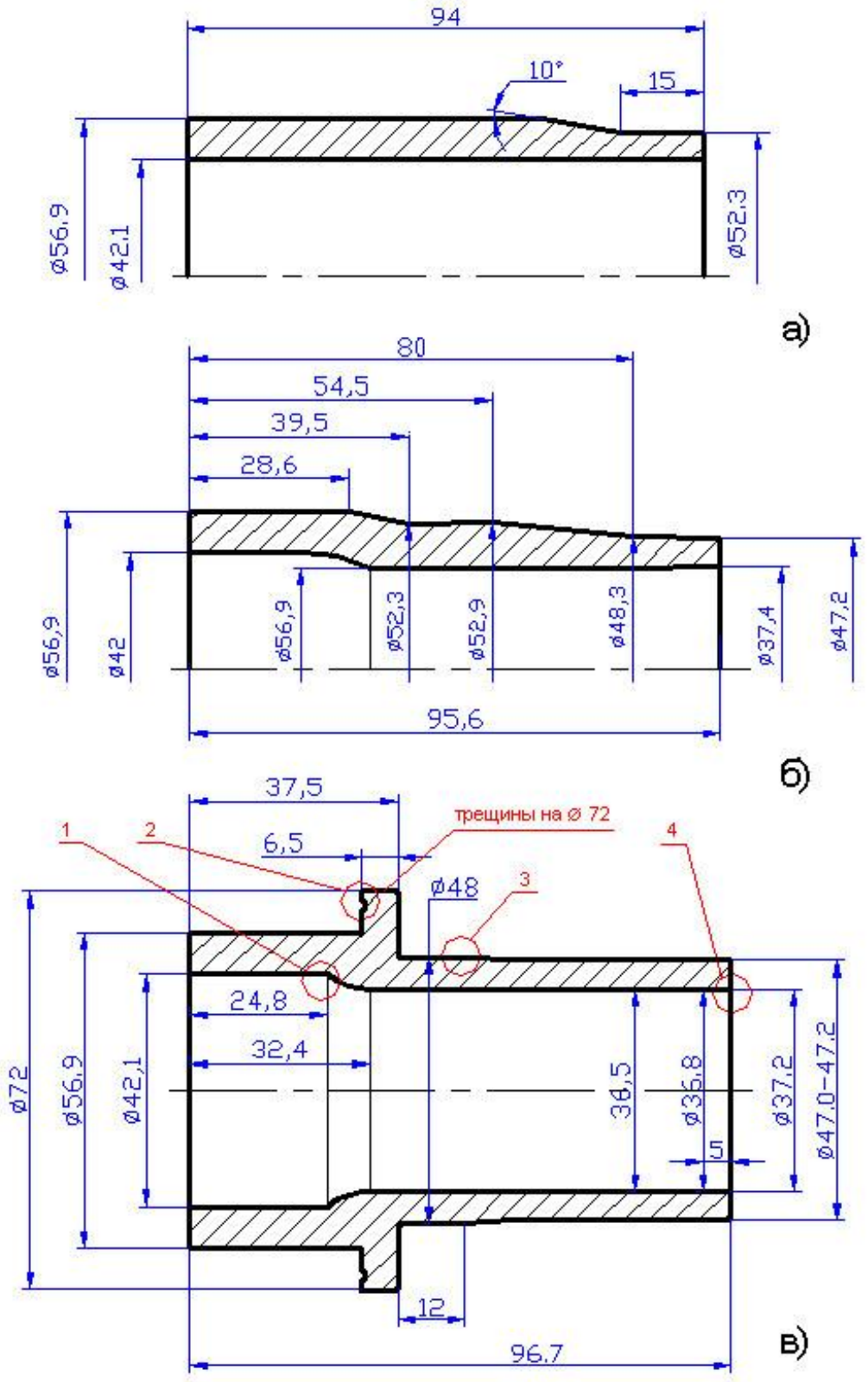


Рис. 3. Эскизы технологических переходов торцевой раскатки
а) исходная заготовка; б) заготовка после 1-го перехода
в) Форма детали после двух операций раскатки

2. Дефектами формоизменения раскатанных деталей являются следующие:
   Зона 1 – незаполнение внутренней фаски с углом 60^0 между диаметрами 42 и 36,5 как на первой, так и на второй операции раскатки;
   Зона 2 – неполное заполнение фланцевой части со стороны матрицы из-за недостаточного усилия машины для раскатки;
   Зона 3 – диаметр цилиндрической части детали на длине 12 мм за фланцем находится за пределами допуска (∅ 47±0,3), из-за особенностей формы заготовки после первой операции раскатки и схемы раскатки используемой на второй операции.
   Зона 4 – расширение внутреннего диаметра детали на длине 5 мм за пределы допуска на размер (36,5 ± 0,2).

Для устранения недостатков формоизменения и исчерпания ресурса пластичности раскатываемого материала было предложено использовать фасонную заготовку для изготовления детали за одну операцию раскатки (рис. 4). Новая форма заготовки под раскатку дала возможность изменить напряженно-деформированное состояние во фланцевой части детали при раскатке за одну операцию.

По данной технологии раскатана партия деталей. Данные измерений всех размеров детали сведены в таблицу 1 (справочные размеры показаны на рис. 4).

Таблица 1

№ Заг-ки	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
1	42.1	56.9	67.5	71.6	36.3	46.8-47.2	59.6	4.6	6.8	37.8	24.9
2	42.1	57.0	68.4	71.5	36.4	46.8-47.0	60.0	5.0	6.6	37.6	25.0
3	42.2	56.8	66.5	71.4	36.3	46.7-47.0	59.0	3.8	6.8	37.9	25.0
4	42.2	56.9	67.7	71.8	36.3	46.8-47.0	59.1	5.0	7.0	38.0	24.9
5	42.2	56.9	66.5	71.4	36.6	46.7-46.9	59.5	4.2	6.6	37.5	25.0

В процессе экспериментальных исследований регистрировались основные параметры процесса раскатки: перемещение раскатного валка и усилие раскатки.

Выполненные исследования показали, что мощности данной раскатной машины недостаточно, для полного заполнения фланцевой части детали.

Для гарантированного заполнения фланца данной детали из стали 20 необходимо использовать раскатную машину с усилием раскатки не менее 400… 500 кН. Исследованиями также установлено, что при использовании фасонной заготовки, ресурса пластичности материала (стали 20) достаточ-

но, для раскатки детали за одну операцию и получения фланца диаметром 72 мм без трещин (рис. 5).

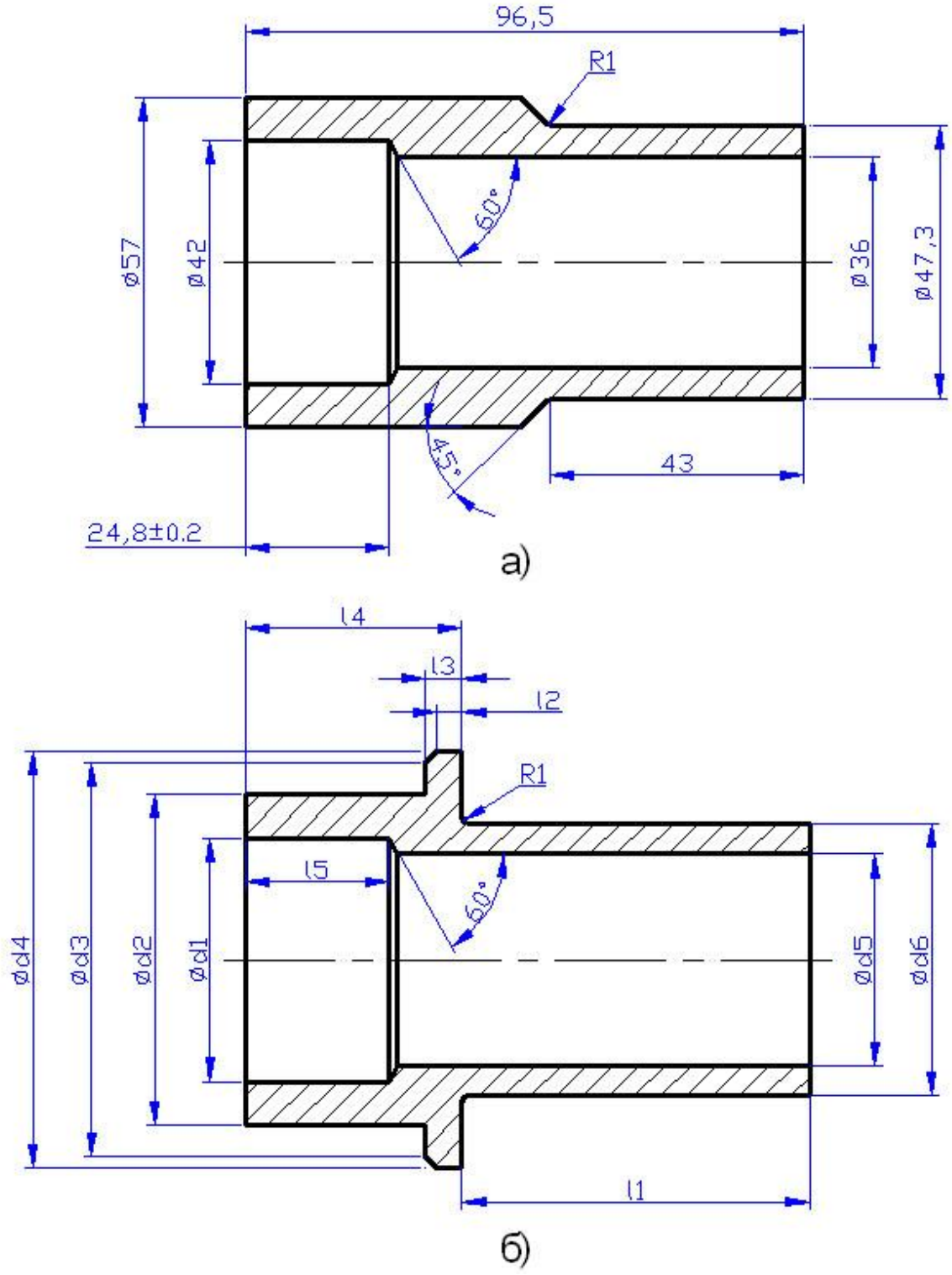


Рис. 4

а) Фасонная заготовка для раскатки детали за одну операцию;

б) Эскиз детали после раскатки за одну операцию с измеряемыми размерами.



Рис. 5. Внешний вид деталей, изготовленных за одну операцию раскатки

Раскатка деталей без поднутрения

Данная технология раскатки была использована для другой модификации детали с постоянным внутренним диаметром 42 мм. Для раскатки использовалась фасонная заготовка из стали 20, эскиз которой с размерами приведен на рис. 6, а.

Форма раскатанных деталей описывалась размерами, показанными на эскизе детали (см. рис. 6, б). Размеры раскатанных деталей представлены в таблице 2.

Таблица 2

№ Заго-го-тов-ки	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	l_1	l_2	l_3	l_4
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
6	42.1	56.9	68.5	71.2	46.7-47.0	62.2	5.5	6.5	37.4
7	42.2	57.0	67.0	71.2	46.7-47.0	60.9	4.5	6.4	37.3
8	42.0	57.0	66.0	71.8	46.7-47.0	61.2	4.0	6.5	37.2
9	42.1	57.0	68.2	71.9	46.7-47.0	62.5	4.9	6.4	37.2
10	42.0	57.0	68.8	72.1	46.7-47.0	62.0	4.9	6.5	37.3

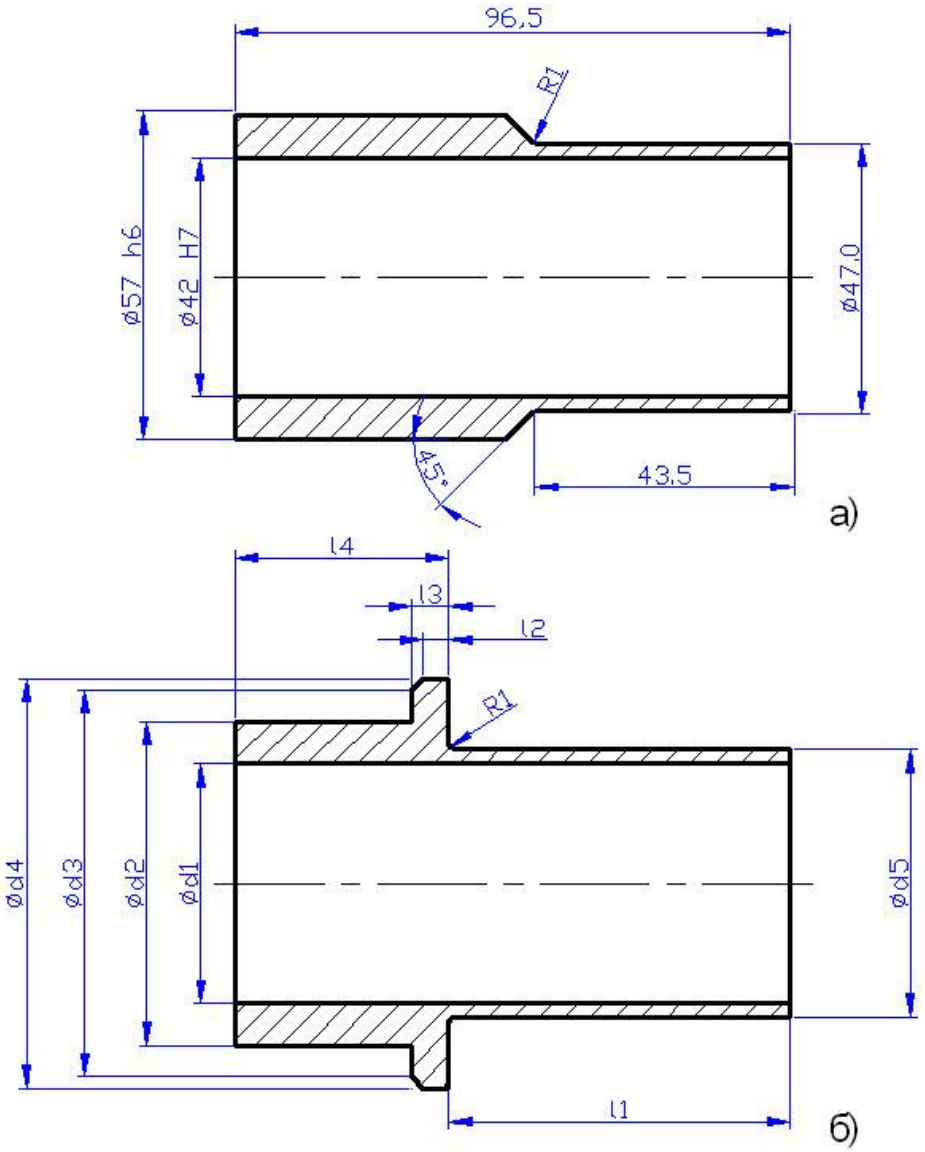


Рис. 6. Эскиз заготовки (а) и детали после раскатки (б)



Рис. 7. Внешний вид раскатанных деталей без поднутрения

ВЫВОДЫ

1. Для стабильного технологического процесса изготовления деталей, соответствующих чертежу с диаметром фланца ∅ 72 мм, необходима раскатная машина с усилием раскатки 500 кН.
2. Изготовление деталей с постоянным внутренним диаметром возможно за одну операцию раскатки при использовании фасонных заготовок.
3. Фасонные заготовки для процессов раскатки могут быть изготовлены как механической обработкой, так и ротационным обжатием трубных заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Третьюхин. Закрытая штамповка методом высадки с выдавливанием. КШП. ОМД, 2010, № 6 с. 43 – 45.
2. Л.П. Семенова, А.А. Семенов, А.Н. Пасько Формообразование наружных утолщений на стенках трубчатых заготовок. КШП. ОМД, 2010, № 9 С. 33 – 37.

УДК 621.983.044

В.С. Мамутов

ВЫРУБКА-ПРОБИВКА ОСОБО ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ НА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКЕ



Вячеслав Сабайдинович Мамутов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия Тел.: (812) 552-95-30, E-mail: vmamutov@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены возможности магнитно-эластоимпульсной штамповки применительно к вырубке-пробивке особо тонколистовых металлов. Представлены характерные образцы деталей. В комплексе LS-DYNA 970 разработана конечно-элементная модель разрушения особо тонколистовых металлов, что позволяет прогнозировать форму среза заготовки, параметры импульсного давления в полиуретане вблизи области разделения. Представлены примеры компьютерных расчетов.

Ключевые слова: магнитно-эластоимпульсная штамповка, вырубка-пробивка, особо тонколистовые металлы, конечно-элементный комплекс LS-DYNA, компьютерная модель, разрушение материала, давление в полиуретане, примеры расчетов

V.S. Mamutov

CUTTING OF ESPECIALLY THIN SHEET METALS ON MAGNETIC-PULSE UNIT WITH USING POLYURETHANE

Prof. Viacheslav S. Mamutov, e-mail: vmamutov@mail.ru,
St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

Features of cutting operations of especially thin sheet metals on magnetic-pulse unit are shown. Characteristic samples of workpieces are presented. By using of LS-DYNA 970 code the finite-element model of destruction for especially thin sheet metals was developed. It allows predicting the form of a cutting shape of the blank, parameters of pulse pressure in polyurethane near of the destruction area. Examples of computer calculations are presented.

Key words: cutting operations, especially thin sheet metals, magnetic-pulse unit, destruction of a material, LS-DYNA 970 code, finite-element model, predicting the cutting shape, parameters of pulse pressure

При изготовлении компактных, легких, надежных приборов в различных областях техники одной из главных проблем является получение сложных по форме точных деталей из особо тонколистовых материалов и фольги (толщиной 0.2 мм и менее). Данная проблема связана с высокой стоимостью технологической оснастки и длительными сроками подготовки производства при изготовлении традиционных штампов. Кроме того, ряд сложных деталей часто не удается изготовить традиционными методами штамповки, что приводит к применению экологически вредных технологий типа химического травления или достаточно сложных технологий типа вакуумного напыления. В 1970…1980 годах на кафедре МиТОМД ЛПИ была разработана и доведена до промышленного использования технология изготовления таких деталей на магнитно-импульсной установке с применением промежуточных эластичных сред – магнитно-эластоимпульсная штамповка (МЭИШ) [1, 2].

Принцип МЭИШ применительно к разделительным операциям штамповки особо тонколистовых металлов иллюстрируется на рис. 1.

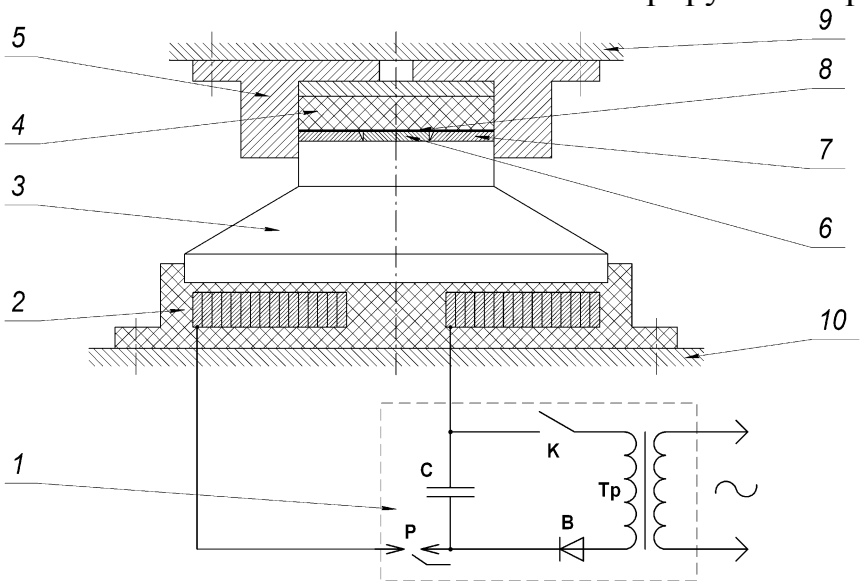


Рис. 1. Технологическое устройство МЭИШ: *1* – магитно-импульсная установка, *2* – плоский спиральный индуктор, *3* – подвижный элемент – концентратор, *4* – эластичная среда, *5* – контейнер, *6* – матрица-шаблон, *7* – обойма, *8* – листовая заготовка; *9, 10* – плиты механического или гидравлического прижима

При разряде конденсаторной батареи магнитно-импульсной установки *1* на спираль плоского индуктора *2* магнитное поле, возникающее в

зазоре между индуктором и плоскостью подвижного элемента *3*, оказывает на него силовое воздействие. Перемещаясь под действием давления импульсного магнитного поля, подвижный элемент создает импульсное давление в эластичной среде *4*, заключенной в контейнер *5*. За счет этого давления осуществляется требуемая технологическая операция – в данном случае вырубка-пробивка особо тонколистового материала *8* по контуру матрицы-шаблона *6*. Для улучшения условий разделения металла и увеличения жесткости подвижной системы применяется обойма *7*. Устройство для МЭИШ располагается между плитами механического или гидравлического прижима *9*, *10*. Обычно в качестве эластичной среды используется полиуретан.

Данный процесс эффективен для получения сложных по форме точных деталей без заусенцев из тонколистовых металлов и фольги с габаритными размерами менее 100…150 мм и толщиной 0.01…0.2 мм. Использование этой технологии в условиях мелкосерийного и опытного производства позволяет в несколько раз снизить трудоемкость изготовления штамповочной оснастки и сроки подготовки производства по сравнению с использованием традиционных штампов. Характерные примеры таких деталей представлены на рис. 2.

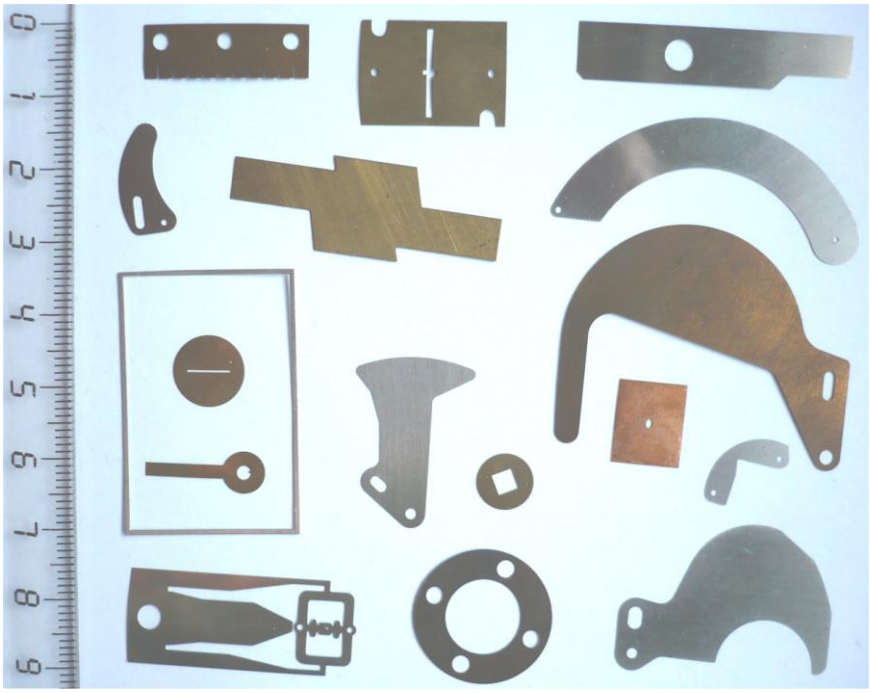


Рис. 2. Примеры деталей из особо тонколистовых металлов и фольги, получаемых методом МЭИШ

Компьютерное моделирование и оптимизация электромеханических процессов в технологическом устройстве для МЭИШ [3, 4] позволили увеличить эффективность преобразования энергии, стойкость элементов тех-

нологической оснастки. При этом использовались оригинальные расчетные модели, ограниченные по возможностям применяемой в то время компьютерной техники. Развитие вычислительной техники, возможностей конечно-элементного комплекса LS-DYNA 3D [5] позволяет расширить области теоретических исследований технологического устройства для МЭИШ. Особенно это касается вопросов, связанных с операциями разделения особо тонколистовых металлов и фольги. В этом случае возможность экспериментальных исследований разрушения материала из-за динамики процесса и малой толщины материала затруднена. Ниже представлены некоторые результаты конечно-элементного моделирования разрушения металла при разделительных операциях, выполняемых при помощи технологии МЭИШ.

При разделительных операциях в случае вырубки-пробивки особо тонколистовых металлов радиус кривизны линии реза обычно значительно превышает толщину заготовки, и деформацией в направлении касательной к периметру линии реза можно пренебречь. Это позволяет в качестве критерия разрушения использовать критическую величину первой главной деформации, которая может быть приближенно определена из диаграммы предельных деформаций (FLD).

Для материала заготовки использована модель «*Modified Piecewise Linear Plasticity*», позволяющая прогнозировать разрушение в виде нарушения сплошности материала. Упрочнение материала заготовки задавалось по линейному закону. Материал инструмента (пуансон, матрица и прижим) задавался упругим – «*Linear Isotropic*» с упругими константами стали. Коэффициент кулоновского трения задавался значениями: статический $\mu = 0.3$ и динамический $\mu = 0.15$. Для контакта задавалась опция «*2D Automatic Single Surface*».

Одной из проблем корректного компьютерного моделирования является правильное задание модели эластичной среды. Чаще всего в качестве эластичной среды используется полиуретан различных марок. Рассмотрены различные модели эластичных сред: высокоэластичная резина «*Blatz-Ko Rubber*» с плотностью $\rho = 1265$ кг/м^3 и с модулем сдвига $G = 0.57$ ГПа, «*Mooney-Rivlin Rubber*», а также модель идеальной сжимаемой жидкости «*Elastic Fluid*». Для сжимаемых материалов задавался динамический модуль объемного сжатия полиуретана $K_d = 2.35 \cdot 10^9$ Па. Установлено, что в условиях достаточно «жесткой» динамики процесса модель идеальной сжимаемой жидкости в ряде случаев дает хорошие результаты.

На рис. 3 представлены характерные стадии разделения заготовки. Расчет выполнен для заготовки из наклепанной бериллиевой бронзы Бр. Б2 толщиной 0.05 мм.

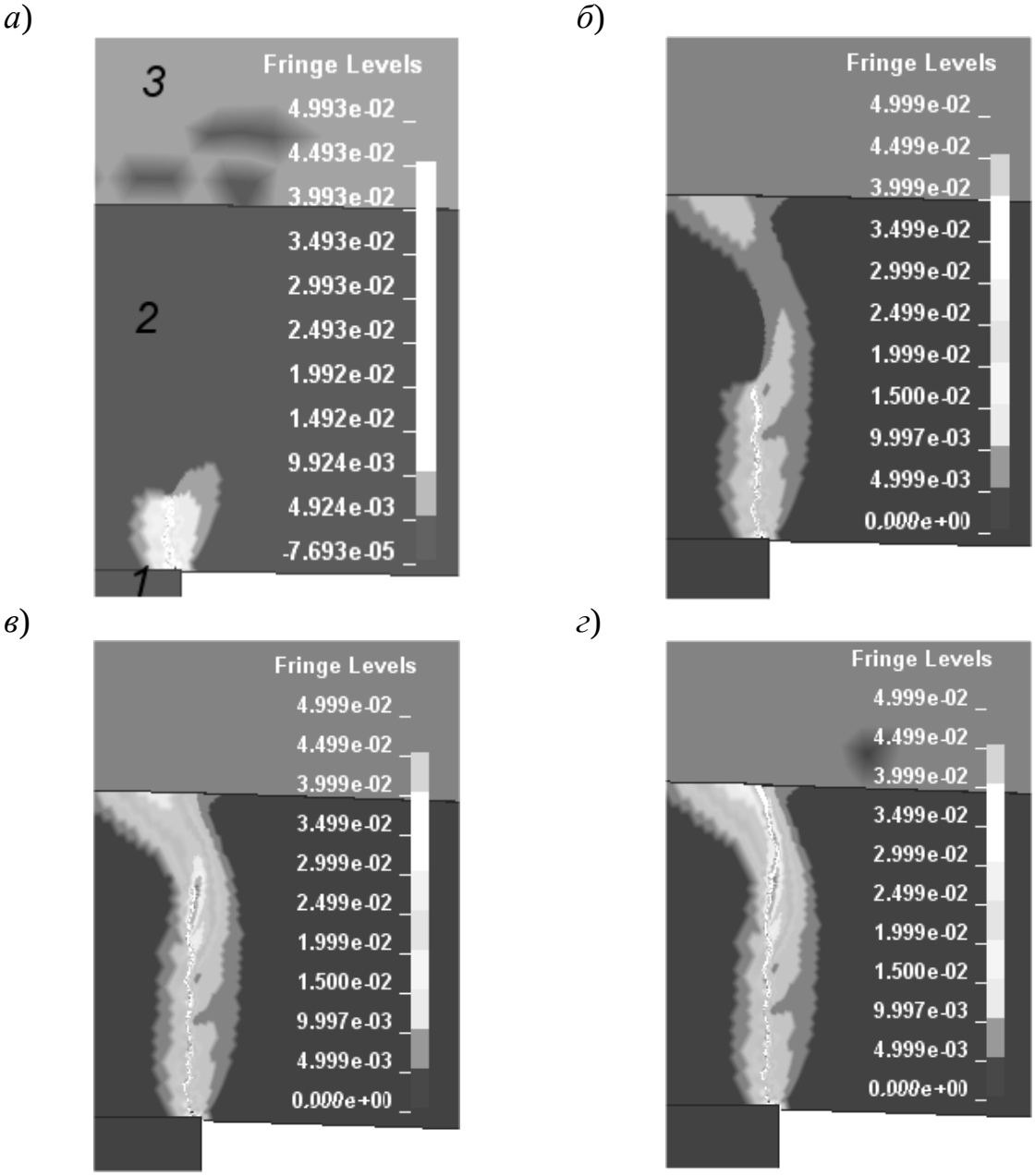


Рис. 3. Характерные стадии разделения заготовки из особо тонколистового металла (*а* – *г*): 1 – матрица, 2 – заготовка, 3 – полиуретан; справа – шкала эффективной деформации

Характер деформирования и разрушения особо тонколистовой заготовки при МЭИШ значительно отличается от разрушения заготовки в условиях штамповки в жестких инструментальных штампах [6]. Разрушение заготовки со стороны матрицы начинается практически сразу (рис. 3, *а*). При этом деформация заготовки со стороны полиуретана практически упругая. Затем зона пластической деформации, идущая со стороны кромки матрицы, достигает верхней поверхности заготовки (рис. 3, *б*). По зоне деформации в сторону полиуретана устремляется трещина (рис. 3, *в*). Ко-

гда трещина выходит на поверхность заготовки, заканчивается разделение и начинается этап отделения отхода (рис. 1, *г*). Образовавшийся отход (справа) скользит относительно детали (слева) и частично сглаживает микронеровности. Также происходит упругая разгрузка заготовки и отхода.

Определенный интерес представляет форма среза заготовки. На рис. 4 представлены два варианта моделирования разделения бериллиевой бронзы толщиной 0.05 мм: *а* – отожженный материал, *б* – максимально наклепанный материал. Для наклепанного материала форма среза может существенно отличаться от вертикальной формы.

а) *б)*

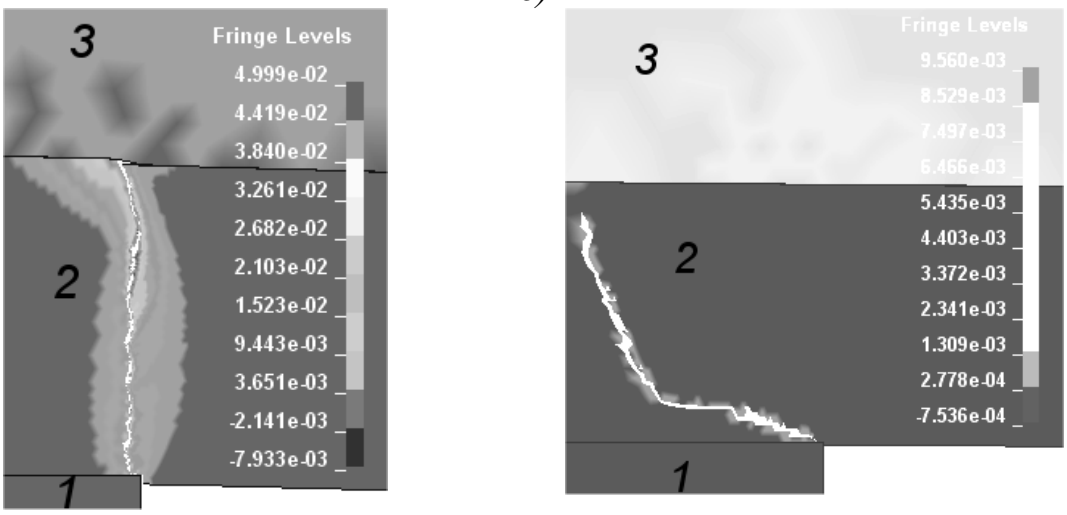


Рис. 4. Форма среза и очаг пластического деформирования при разделении особо тонколистового металла: *а* – отожженный материал, *б* – максимально наклепанный материал

С точки зрения стойкости полиуретана интерес представляют значения локальных давлений вблизи режущей кромки матрицы в момент разделения металла. Обычно в этой области имеет место максимальный износ полиуретана. Конечно-элементная модель, выполненная в комплексе LS-DYNA 970, позволяет оценить параметры этого давления. На рис. 5 показаны временные зависимости давления в полиуретане вблизи кромки матрицы (*A*) на фоне давления вблизи границы раздела полиуретан – подвижный элемент (*B*). Из рисунка видно, что давление вблизи кромки матрицы в десятки раз превышает давление в общей массе полиуретана. Также видно, что давление при этом меняет свой знак, что и приводит со временем к разрушению полиуретана в данной зоне.

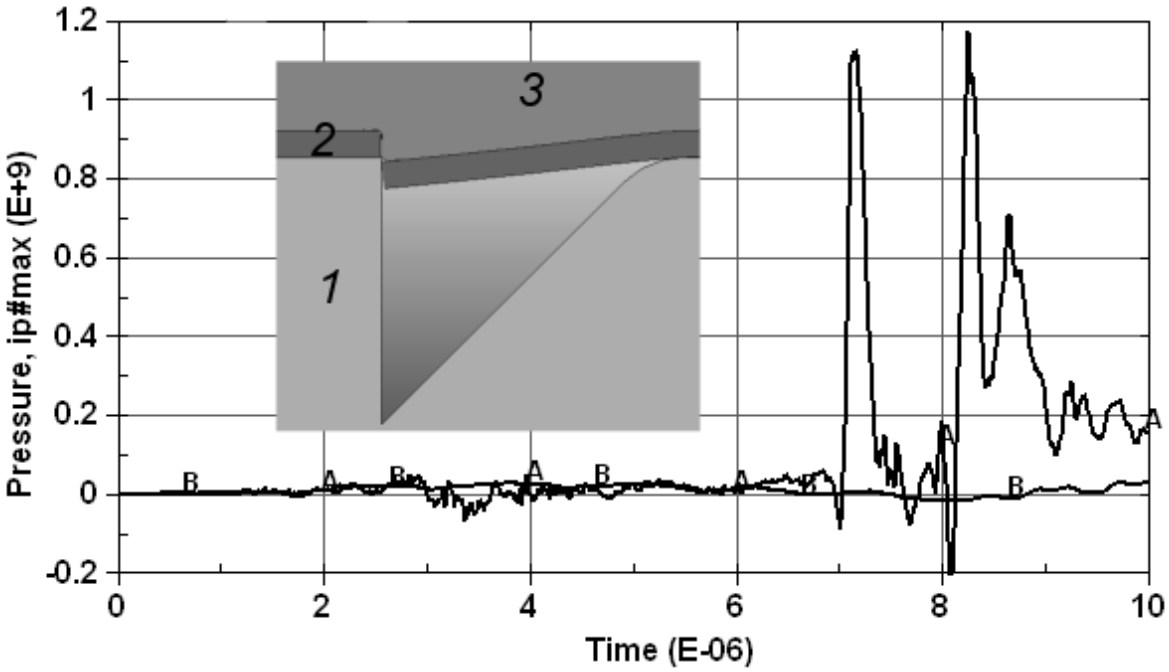


Рис. 5. Давление в полиуретане: *1* – матрица и обойма, *2* – заготовка, *3* – полиуретан; *A*– вблизи кромки матрицы, *B* – внутри контейнера

Таким образом, конечно-элементная модель в комплексе LS-DYNA 970 позволяет осуществлять расчет разрушения особо тонколистовых металлов в процессах магнитно-эластоимпульсной штамповки, что дает возможность прогнозировать форму среза заготовки, параметры импульсного давления в полиуретане вблизи области разделения. Это может быть использовано при проектировании технологии и технологического устройства МЭИШ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магнитно-импульсная штамповка с применением промежуточных эластичных сред / К.Н. Богоявленский, В.Б. Гиндин, В.С. Мамутов, А.И. Орешенков.– Л.: ЛДНТП.–1982.– 35 с.
2. Магнитно-эластоимпульсная вырубка-пробивка тонколистовых материалов / Богоявленский К.Н., Гиндин В.Б., Мамутов В.С., Орешенков А.И., Пережогин А.Н. // КШП № 7, 1984, С.12-14.
3. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубки-пробивки тонколистовых материалов / Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотраков Д.В. // Металлообработка, 2001, №2, С. 28-32.
4. Преобразование импульсного давления механическим концентратором с учетом волновых процессов / Здор Г.Н., Мамутов А.В., Маму-

тов В.С. // Доклады национальной академии наук Беларуси. Технические науки. Том 46, № 3. 2002.-С.115-119.
5. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.
6. Мамутов В.С. Компьютерное моделирование разрушения при вырубке-пробивке особо тонколистовых металлов. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 465-470.

УДК 621.01

И. Ф. Прогальский, Б. Г. Вендлер, В. В. Тимофеев, Д. А. Филиппов

ДОСТИЖЕНИЕ ВЫСОКОЙ АДГЕЗИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ОСАЖДЕНИИ СВЕРХТВЕРДЫХ ПОКРЫТИЙ НА БЫСТРОРЕЖУЩУЮ СТАЛЬ



Иван Федорович Прогальский
Новгородский Государственный Университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия
Лодзинский Университет Технологий, Лодзь, Польша.
Тел.: (8162)62-6429, E-mail: progalskiy@gmail.com.



Богдан Вендлер, профессор,
Лодзинский Университет Технологий, Лодзь, Польша.
Тел.: (4842)631-2265, E-mail: bowe@p.lodz.pl



Владимир Владимирович Тимофеев
д.т.н., профессор
Новгородский Государственный Университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия
Тел.: (8162)62-6429, E-mail: Vladimir.Timofeev@novsu.ru



Дмитрий Александрович Филиппов
д. ф.-м.н., профессор
Новгородский Государственный Университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия
Тел.: (8162)62-6429, E-mail: Vladimir.Timofeev@novsu.ru

Аннотация

В работе описывается создание износостойкого инструмента путем высокоскоростного нанесения сверхтвердого покрытия nc-TiN/a-Si_3N_4 на быстрорежущую сталь. Основное внимание уделяется достижению высокой адгезии между покрытием и подложкой, путем осаждения промежуточного градиентного слоя, постепенно меняющего свой химический состав от Cr к TiSiN.

Ключевые слова: сверхтвердые покрытия, высокоскоростное осаждение, адгезия.

I.F. Progalskiy, B. Wendler, V.V. Timofeev, D. A. Filippov

ACHIEVEMENT OF A HIGH ADHESION COEFFICIENT DURING HIGH SPEED DEPOSITION OF SUPERHARD COATINGS ONTO HIGH SPEED STEEL

MSc. Ivan F. Progalskiy[1,2], e-mail: progalskiy@gmail.com;
Prof. Bogdan Wendler[2], e-mail: bowe@p.lodz.pl;
Prof. Vladimir V. Timofeev[1], e-mail: Vladimir.Timofeev@novsu.ru
Prof. Dmitri A. Filippov[1].
[1] Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (NovSU), Russia,
[2]Lodz University of Technology, Poland.

Abstract

The article describes how to create durable cutting tool by means of high speed deposition of a superhard nanocomposite coating nc-TiN/a-Si3N4 onto high speed steel substrate. The main attention is focused to achievement of a high adhesion coefficient of the coating to the substrate by deposition of an interlayer gradually changing its chemical composition from Cr to TiSiN.

Key words: superhard coatings, highspeed deposition, adhesion.

Создание износостойкого и дешевого режущего инструмента является актуальной задачей в машиностроении. Качество изделия напрямую связано с качеством применяемого инструмента, а его срок службы напрямую связан с себестоимостью продукта. Для создания износостойкого и относительно недорогого инструмента было принято решение использовать широко распространенный и не дорогой материал – быстрорежущую сталь. Другим решением, увеличивающим срок службы режущей кромки инструмента, стало использование сверхтвердого нанокомпозитного покрытия nc-TiN/a-Si_3N_4. Данное покрытие отличается высоким сопротивлением к распространению трещин, а также обладает сверхтвердостью выше 40 GPa [1,2]. Описанные выше характеристики объясняются особенной структурой покрытия, где нанокристаллиты нитрида титана распределены в аморфной матрице нитрида кремния, причем важным условием является наноскопический размер зерен нитрида титана, стремящийся к 2-3nm, а так же чрезвычайно тонкий слой нитрида кремния, стремящийся к толщине одного атомного слоя [2,3,4]. Согласно Вепрку [2,3], при условии зарождения трещины в нанокристалле нитрида титана, ее распространение будет остановлено барьером из нитрида кремния. С другой стороны, если трещина получит свое распространение в нитриде кремния, то она будет остановлена первым встреченным на пути зерном нитрида титана [3]. Другой важной характеристикой покрытия является высокая устойчивость к тем-

пературной коррозии - до 1100ºС. Это объясняется чрезвычайно высокой плотностью оксида кремния, образовавшегося под воздействием высокой температуры и окружающей атмосферы в поверхностных слоях покрытия, что блокирует дальнейшее проникновение кислорода глубже в покрытие.

Для осаждения покрытия был выбран новый метод [5,6] Магнетронного Распыления Газо-импульсной Плазмой, отличающийся высокой производительностью (6-10 μm/h), в условиях высокой ионизации атмосферы, которая запускает сложные химико-физические процессы, трудно реализуемые при использовании стандартных методов PVD [7-9]. Высокая производительность метода, как и дешевизна основного элемента (генератора импульсов), значительно удешевляет стоимость продукции, в сравнении, например, с технологией HIPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering [10,11]).

Высокая производительность метода является и основной проблемой при нанесении покрытий, именно она ведет к плохой адгезии между покрытием и подложкой.

В настоящей статье описано решение данной проблемы путем применения градиентного промежуточного слоя, постепенно меняющего свой химический состав, от подложки к основному покрытию, который имеет хорошую адгезию к соответствующим поверхностям.

В эксперименте использовался PVD аппарат, отличительными чертами которого являлись наличие замкнутого магнитного поля в камере создаваемого 4 прямоугольными несбалансированными магнетронами с размерами 264x111 мм. [12]. Другим важным отличием было наличие источника газовых импульсов, создающего магнетронные разряды с плазмой высокой плотности.

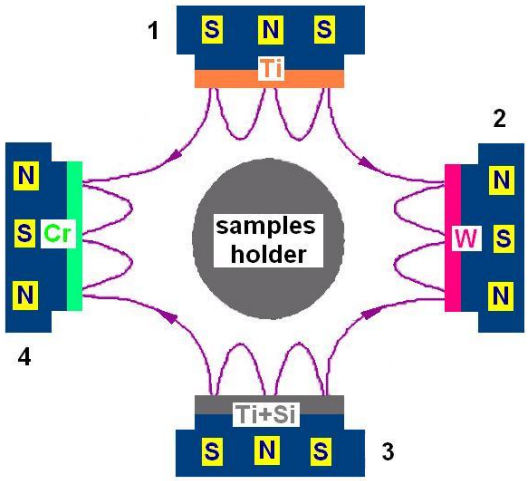


Рис. 1. Схема расположения четырех магнетронов в камере, образующих замкнутое магнитное поле



Рис. 2. Внутренний вид камеры аппарата.

В качестве образцов были использованы диски 25 мм диаметром и 5 мм толщиной изготовленные из закаленной быстрорежущей стали Vanadis 23.

Для распыления применялись 2 мишени, сделанные из спеченных порошков титана и кремния (Ti+5.48 wt. % Si), а так же одна мишень из чистого Cr (4N).

В качестве газов, использовались аргон и азот, подаваемые короткими порциями, согласно заявкам на патент [5, 6].

Образец устанавливался в держателе, который нагревался до 450 ºС. Данная температура поддерживалась постоянной в течение всего процесса.

Перед процессом нанесения покрытия из камеры откачивался воздух до 10^{-4} Pa.

Так же перед процессом нанесения покрытия поверхность образцов отчищалась с помощью газового разряда с поляризацией до – 1000 В.

Целью первого эксперимента была проверка адгезии между нанокомпозитным покрытием nc-TiN/a-Si_3N_4 и подложкой из быстрорежущей стали.

Процесс нанесения покрытия протекал при следующих параметрах:

Поляризация подложки Bias -50V.

Давление процесса P = 0.1– 0.9 Pa

Мощность, подводимая к магнетронам 4 kW

Температура подложки T = 450 ºC

Время процесса t = 1 час

Целью второго эксперимента было улучшение адгезии между покрытием nc-TiN/a-Si_3N_4 и быстрорежущей сталью, за счет использования промежуточного покрытия, постепенно меняющего свой химический состав, начиная от чистого Cr, постепенно переходя в CrTiN и затем постепенно переходя в TiSiN. Описанные переходы осуществлялись за счет из-

менения интенсивности распыления соответствующих мишеней.

Процесс нанесения покрытия протекал при следующих параметрах:

Поляризация подложки Bias -50V

Давление процесса P = 0.1– 0.9 Pa

Мощность, подводимая к магнетронам 0- 4 kW

Температура подложки T = 450 ºC

Время процесса t = 1 час

Характеризация покрытий осуществлялась при помощи оптического микроскопа, *SEM* микроскопа, тестирование царапанием с использованием индентора Роквелла С стиля.

Результатами тестирования первого покрытия с использованием теста царапанием:

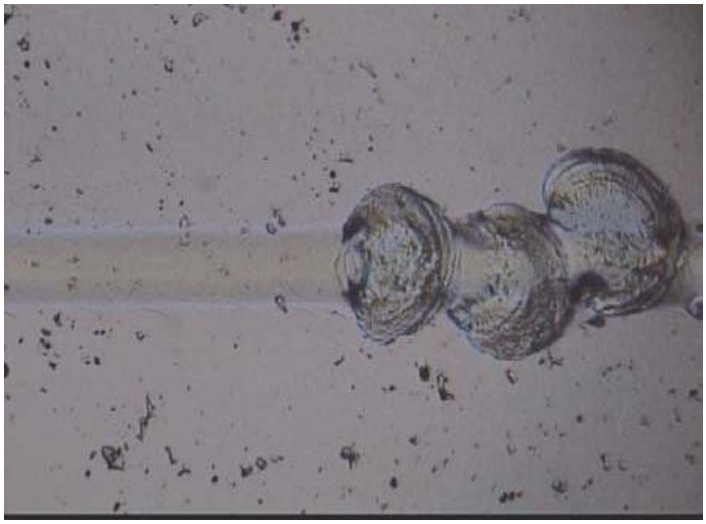


Рис. 3. Морфология поверхности образца вблизи царапины.
Покрытие начинает отслаиваться при нагрузке 36.01N

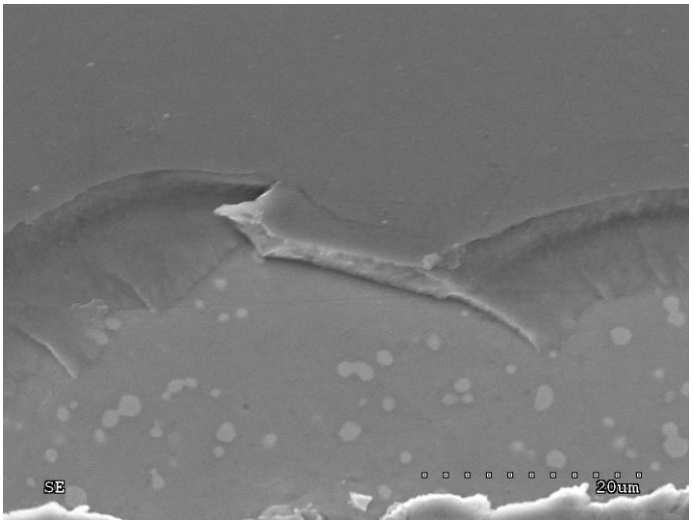


Рис. 4. Морфология поверхности образца вблизи царапины.

Адгезия покрытия к быстрорежущей стали плохая. В большинстве случаев покрытие самопроизвольно отслаивается от подложки.
Результаты тестирования второго покрытия (с использованием промежуточного покрытия). Тест царапанием:

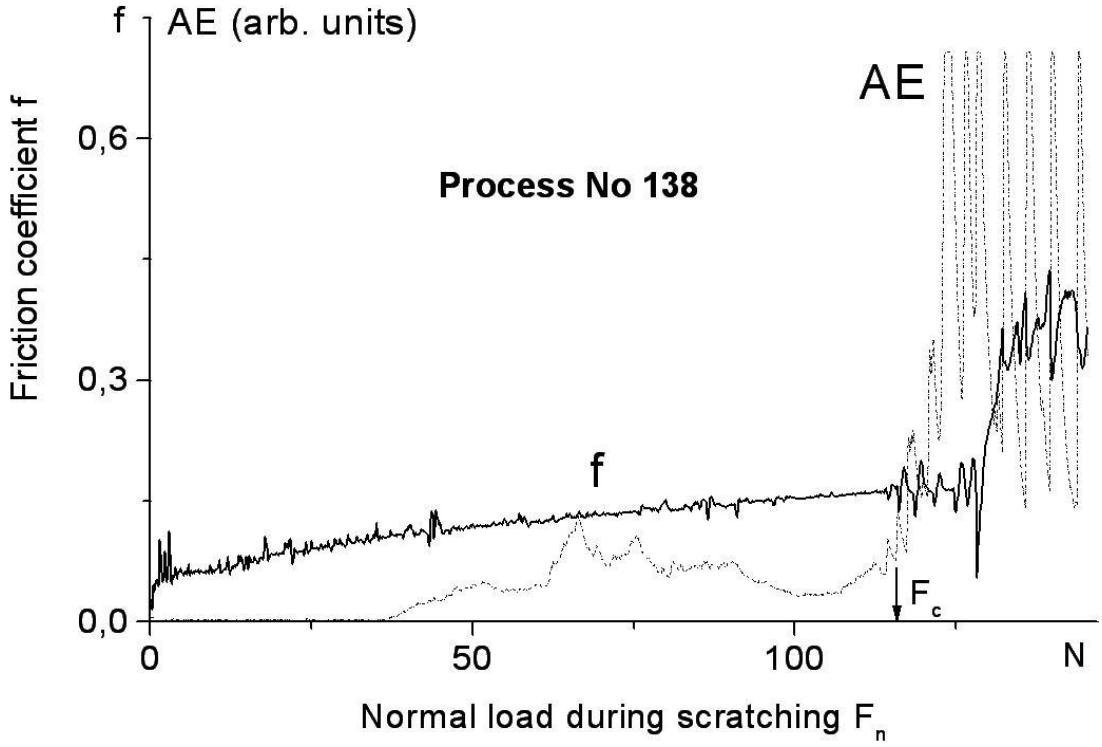


Рис. 5. График коэффициента трения f и акустической эмиссия AE как функции нормального нагружения F. Адгезия составляет 116 N

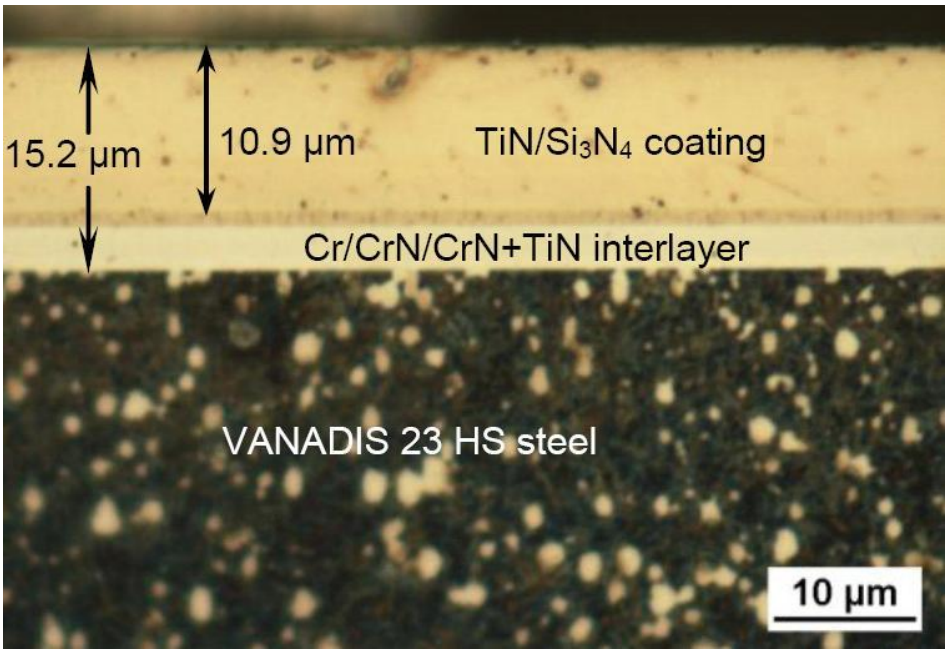


Рис. 6. Морфология поверхности шлифованного поперечного сечения образца из быстрорежущей стали с сверхтвердым покрытием nc-TiN/a-Si_3N_4 и промежуточным покрытием Cr/CrN/CrN+TiN

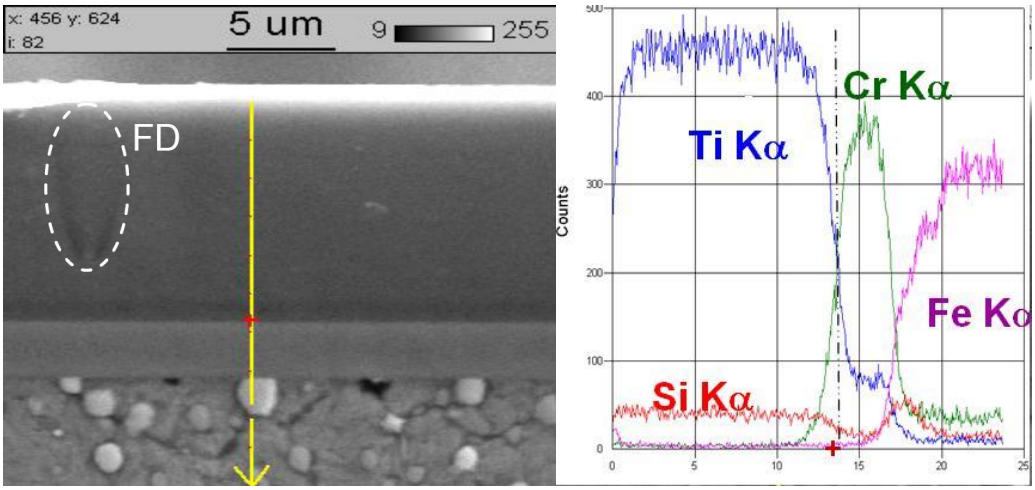


Рис. 7. Морфология поперечного сечения подложки из быстро режущей стали Vanadis 23 с сверхтвердым nc-TiN/Si3N4 нанокомпозитным покрытием и соответствующее ему *SEM SE* изображение системы покрытие/ подложка в направлении профиля линейного сканирования.

Выводы

Достигнута хорошая адгезия покрытия к быстрорежущей стали Vanadis23 (до 116N). Покрытие было осаждено с высокой производительностью – 10μм/ч



Рис. 8. Образец сделанный из быстро режущей стали Vanadis 23 со сверхтвердым nc-TiN/Si3N4 нанокомпозитным покрытием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S.Vepřek, A. Niederhofer, K. Moto, P. Nesladek, H. Maennling and T. Bolom Nanocomposites nc-TiN/a-Si3N4/a- & nc-TiSi2 with hardness exceeding 100 GPa and high fracture toughness // Materials Research Society Symposium - Proceedings 2000. – Vol. 581, p. 321-326

2. Vepřek S., Hausmann M., Reiprich S., Shizi L., Dian J.: Novel thermodynamically stable and oxidation resistant superhard coating materials // Surface and Coatings Technology 1996. – v. 86-87 - 394-401
3. Vepřek S., Vepřek-Heijman M.G.J., Zhang R.: Chemistry, physics and fracture mechanics in search for superhard materials and the origin of superhardness in nc-TiN/a-Si_3N_4 and related nanocomposities // J. Physics and Chemistry of Solids 2007. – Vol. 68, p. 1161-1168
4. Huang P.-K., Yeh J.-W.: Inhibition of grain coarsening up to 1000 ^{0}C in (AlCrNbSiTiV)N superhard coatings // Scripta Materialias 2010. – Vol. 62. - p. 105-108.
5. B. Wendler, I.F. Progalskiy et al., patent application P-399606 submitted to the Polish Patent Office.
6. B. Wendler, I.F. Progalskiy et al., patent application P-400018 submitted to the Polish Patent Office.
7. Wendler B. et al.: A method of creation of high density gas discharge plasma for substrate cleaning and coatings' deposition. Patent application No. P-391523 submitted to the Polish Patent Office the 15th of June 2010.
8. B. Wendler, T. Moskalewicz, I.F. Progalskiy, W. Pawlak, M. Makowka, K. Wlodarczyk, P. Nolbrzak, A. Czyrska-Filemonowicz and A. Rylski: Hard and superhard nanolaminate and nanocomposite coatings for machine elements based on Ti6Al4V alloy// J. Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2010. – Vol. 43, №. 1 p. 455-462.
9. B. Wendler, I.F. Progalskiy: New type HIPIMS reactive magnetron deposition of superhard nanocomposite nc-TiN/a(nc)-SixNy coatings.
10. V. Kuznetsov, K. Macak, J.M. Schreiber, U. Helmersson, I. Petrov: A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. Surface and Coatings Technology 122 (1999) 290-293.
11. A.P. Ehiasarian: High-power impulse magnetron sputtering and its applications. Pure and Applied Chemistry Vol. 82 Iss. 6 (2010) 1247-1258.
12. Kim K.H., Choi S.-R., Yoon S.-Y.:Superhard Ti-Si-N coatings by a hybryd system of arc ion plating and sputtering techniques// Surface and Coatings Technology 2002. – Vol. 2978. - p. 243-248.

УДК.621.735.79 М.М. Радкевич, Д.Ю. Фомин

ПТМО ДЛЯ СХЕМ ОБЛОЙНОЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК УДЛИНЕННОЙ ФОРМЫ



Михаил Михайлович Радкевич – д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
тел. +7 (812) 552-9302



Дмитрий Юрьевич Фомин – аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
тел. +7 (812) 552-9302

Аннотация

Представлены результаты разработки технологического процесса ПТМО для схем штамповки поковок удлиненной формы. Предложена рациональная температурно-временная схема техпроцесса. Имеются сведения о динамике изменения структуры сталей. Произведено сравнение механических заготовок, изготовленных по различными режимам ТМО.

Ключевые слова: полугорячая термомеханическая обработка, технологический процесс, удлиненной формы поковки, температурно-временная схема, открытый штамп

SEMIHOT THERMOMECHANICAL TREATMENT UNDER FORGING OF ELONGATED PREFORMS

Abstract

Technological process of semihot thermomechanical treatment under forging of elongated preforms are provided. The rational time- and temperature scheme of technical process is offered. Information regarding changes in structure of steels are presented. Comparison of the mechanical properties under different thermomechanical treatment modes are made.

Keywords: semi-hot thermomechanical treatment, technological process, elongated preform, the temperature- and time scheme, the open stamp

Повышения эксплуатационной прочности стальных заготовок возможно достичь при применении термомеханической обработки в переходном интервале температур теплой и горячей пластической деформации, то есть при $\boldsymbol{T}_{\text{д}} \in [0.6 \div 0.7] \boldsymbol{T}_{\text{пл}}$. В дальнейшем будем называть ее

полугорячей термомеханической обработкой (ПТМО). Наши исследования показывают, что данная технология является промышленно реализуемой, способствует снижению затрат на энергоносители в процессе производства и на металл при дальнейшей механической обработке. Может использоваться при производстве промышленных поковок различной номенклатуры.

Для решения вопросов, связанных с разработкой технологического процесса полугорячей термомеханической обработки, нами проведены комплексные исследования. Исследования состояли из компьютерного моделирования процесса упругопластического формоизменения заготовки; физического моделирования технологического процесса на пластомере по температурным, силовым, скоростным и временным параметрам; опытной штамповки поковок «тяга соединительная» в условиях кузнечно-штамповочного цеха в рамках техпроцесса ПТМО.

Конечно-элементное моделирование упругопластического формоизменения заготовки в программном комплексе *Simufact.Forming* позволило рекомендовать интервал деформационного воздействия $\boldsymbol{T}_{\text{д}} \in (0.6 \div 0.7)\boldsymbol{T}_{\text{пл}}$ как наиболее рациональный с экономической и инженерной точки зрения при проведении термомеханической обработки. А также предположить, что при этой температуре в легированных сталях образуется большее количество дисперсных частиц, имеющих дислокационно-дефектную природу. Эти частицы, располагаясь по плоскостям скольжения, активируют поверхности скольжения внутри кристалла, позволяя кристаллам быстрее вытягиваться в направлении сдвига, то есть принимать пространственно-геометрическую конфигурацию соответствующую ручью штампа. При этом скопления дисперсных частиц у границ кристаллов увеличивают удельную плотность барьеров скольжения на внутрикристаллитном уровне, что в целом оказывает повышенное сопротивление разрушению.

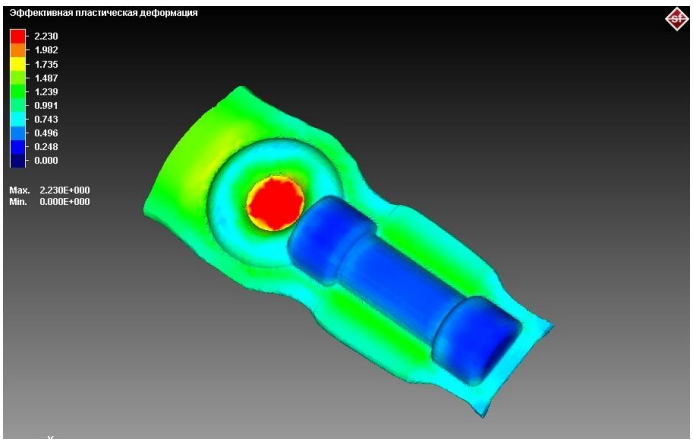


Рис. 1. Пространственно-геометрическая модель поковки, полученная в программном комплексе Simufact.Forming

С целью подтверждения сделанных предположений было проведено физическое моделирование технологического процесса на модуле «растяжение-сжатие» пластомера Gleeble-3800. Основными варьируемыми параметрами были: температура деформирования $\boldsymbol{T_д}$ в диапазоне от Ac_3 до Ac_3+350ºС, степень деформации ε в диапазоне от 20% до 60%, время последеформационной паузы $\tau_п$ в диапазоне от 20 до 60 сек.

Микроструктурные исследования позволили установить рациональное время вынужденный выдержки стали после деформации [1]. Для сталей мартенситного и перлитного классов это время не должно быть более 30 сек., а для сталей аустенитного классов не более 20 сек. При данной выдержке структура сталей однородная и мелкозернистая, что подтверждается металлографическими исследованиями. Увеличение времени подстуживания не оказывает существенного влияния на однородность структуры металла, но снижает степень дисперсности стали, что свидетельствует о развитии процессов собирательной рекристаллизации.

Исследования тонкой структуры сталей при варьировании температуры деформационного воздействия показали, что при температурах горячей пластической деформации $\boldsymbol{T_д \geq 0.7 T_{пл}}$ карбидная фаза растворена в зерне, а с понижением температуры деформационного воздействия в переходную область до $\boldsymbol{T_д} \in [0.6 \div 0.7] \boldsymbol{T_{пл}}$, карбиды выделяются по границам зерен, в основном ближе к внутренней зеренной полости, и реже в наружною межкристаллитную область. За счет этого увеличивается удельная плотность барьеров сдвига.

Механические испытания, после варьирования степени деформации показали, что максимум прочности наблюдается у образцов, отштампованных со степенью деформации 30% [2]. Дальнейшее увеличение степени деформации не оказывает существенного влияния на прочность стали.

По результатам конечно-элементного и физического моделирования была предложена рациональная с инженерной и экономической точки зрения температурно-временная схема технологического процесса ПТМО: аустенизация при температуре Ac_3+(350÷400)ºС, деформация при температуре $\boldsymbol{T_д} \in (0.6 \div 0.7) \boldsymbol{T_{пл}}$, со скоростью 5 $с^{-1}$ и степенью деформации ε=30%, последеформационная пауза не более 30 сек., высокоскоростное охлаждение, отпуск при необходимости в соответствии с техническими условиями.

Чтобы в условиях кузнечно-штамповочного цеха выявить динамику изменения структуры и механических свойств сталей при штамповке по заводскому и рекомендованному режиму ПТМО были отштампованы поковки типа «тяга соединительная». Заводской режим для стали 40Х заключался в нагреве заготовки до температуры $\mathbf{T_н = A_{c3} + 400 = 1215°C}$, деформации при этой температуре со степенью деформации $\boldsymbol{\varepsilon}$ = 30%;

закалке в воду; отпуске при температуре $\mathbf{T_{отп}} = 520°C$. Заводской режим для стали 20Х13 заключался в нагреве заготовки до температуры $\boldsymbol{T_н} = \boldsymbol{A_{c3}} + 400 = 1300°C$, деформации при этой температуре со степенью деформации $\boldsymbol{\varepsilon} = 30\%$; закалки в воду; отпуске при температуре $\boldsymbol{T_{отп}} = 450°C$. Результаты механических испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение механических свойств поковок

	Сталь 40Х		Сталь 20Х13	
	Заводской режим	ПТМО	Заводской режим	ПТМО
твердость	HRC 20	HRC 35	HRC 25	HRC 44
временное сопротивление $\sigma_в$, МПА	1050	1050	660	1160
условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПА	850	930	850	1020
относительное удлинение δ, %	9	10,4	16	13,2
относительное сужение ψ,%	45	48,7	55	42,2
ударная вязкость KCU, кДж/м^2	670	790	613	560

Анализ механических свойств показал, что поковки, изготовленные на КГШП по режимам полугорячей термомеханической обработки, имеют механические свойства выше, чем у поковки, изготовленные по стандартной заводской технологии. Так для стали 40Х после предлагаемой полугорячей термомеханической обработки получено повышение характеристик твердости на 75%, условного предела текучести на 10%, ударной вязкости на 18%; для стали 20Х13 твердости на 76%, временного сопротивления разрушению на 75%, условного предела текучести на 20%; для стали 08Х18Н10Т твердости на 5%, временного сопротивления разрушению на 2%, условного предела текучести на 23%, ударной вязкости на 11%. По итогам производственного освоения техпроцесса можно заключить, что повышение механических свойств исследуемых сталей произошло в результате качественных изменений в структуре и тонком строении металла.

Анализ структуры на межкристаллитном уровне показал, что с понижением температуры деформирования до температурного интервала, соответствующего теплой пластической деформации $(0.6 \div 0.7\boldsymbol{T_{пл}})$, сталь имеет более измельченную структуру, чем при температурах горячего

пластического деформирования (более $0.7\boldsymbol{T}_{\text{пл}}$**)**. При этом разнозернистость стали падает, а гомогенность сплава увеличивается.

Экономический расчет показал, что предлагаемые режимы являются экономически эффективными, так как позволяют снизить себестоимость продукции в среднем на 23% за счет уменьшения затрат на энергоносители, металл и механическую обработку.

Выводы

а) Исследован технологический процесс термомеханической обработки стальных заготовок для схем штамповки в открытых штампах на КГШП в переходном температурном интервале теплой и горячей упругопластической деформации $(0.6\div0.7)\boldsymbol{T}_{\text{пл}}$. Разработана и опробована рациональная агрегатная и температурно-временная схема технологического процесса: предварительная температурная обработка в печи – аустенизация, штамповка на КГШП в интервале $\boldsymbol{T}_{\text{д}}\in(0.6\div0.7)\boldsymbol{T}_{\text{пл}}$, последеформационная выдержка в естественных условиях не более 30 сек., высокоскоростное охлаждение, термообработка в соответствии с техническими условиями.

б) Штамповка заготовок удлиненной формы в рамках предложенного технологического процесса термомеханической обработки в интервале температур деформирования $(0.6\div0.7)\boldsymbol{T}_{\text{пл}}$ позволяет получать поковки с повышенной прочностью и пластичностью.

в) Повышение прочности достигается за счет уплотнения и фрагментации микроструктуры, а повышение пластичности за счет насыщения тонкой структуры дисперсными частицами дислокационно-дефектной природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. Влияние последеформационной паузы на структуру поковок при полугорячей термомеханической обработке // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Международной научно-практической конференции. / Под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С.645-650.
2. Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. Влияние температуры деформирования и степени деформации на прочность и структуру поковок при полугорячей термомеханической обработке. Ползуновский альманах, №1/2012, Барнаул, с.65-68.

УДК 621.9.011 Д. Ю. Фомин

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ ШТАМПОВКЕ ЗАГОТОВОК В ОТКРЫТЫХ ШТАМПАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ



Дмитрий Юрьевич Фомин – аспирант кафедры «Технология конструкционных материалов и материаловедение».
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
195251, Санкт-Петербург, ул.Политехническая д.29
тел. +7 (812) 552-9302

Аннотация

Исследуются закономерности протекания процессов статической и динамической рекристаллизации в сталях основных структурных классов при применении термомеханической обработки к схемам облойной штамповки заготовок удлиненной формы. При этом анализируются структурные превращения тонкой структуры стали. Представлены сведения о механизме упрочнения и разупрочнения исследуемых сталей.

Ключевые слова: термомеханическая обработка, штамповка, тонкая структура, рекристаллизация, просвечивающая электронная микроскопия

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN STEELS UNDER THERMOMECHANICAL TREATMENT FOR THE PROCESS OF FORGING IN OPEN STAMPS

Dmitry Fomin, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Static and dynamic recrystallization in steels of main structural classes under thermomechanical treatment for the process of forging metal performs in open stamps are observed. Structural and phase transformations on the sub-structural level were analyzed. The process of hardening are provided.

Key words: thermomechanical treatment, forging, substructure, recrystallization, translucent electron microscopy

Развитие технологических процессов термомеханической обработки применительно к схемам штамповки поковок удлиненной формы в открытых штампах сдерживается недостаточной изученностью механизма

протекания процессов рекристаллизации при изготовлении поковок по известным температурно-временным и энергосиловым параметрам. Кажущаяся возможной трансформация механизма протекания рекристаллизационных процессов при термомеханической обработке во время прокатки [1,2] не достаточна для изучения техпроцессов термомеханической обработки для схем облойной штамповки поковок удлиненной формы. Причинами этому служит необходимость назначения дополнительного времени выдержки после деформации в целях проведения технологической операции обрезки облоя. Вынужденная выдержка не позволяет организовать немедленную закалку стали после деформации [3], что инициирует процессы рекристаллизации.

С целью изучения влияния рекристаллизационных процессов в сталях проведены исследования тонкой структуры сталей 40Х, 20Х13. Для этого осуществлено физическое моделирование процесса термомеханической обработки на пластомере *Gleeble-3800*. Температурно-временной цикл технологического процесса ТМО назначался в соответствии с рекомендациями [4,5]: аустенизация при $T_н \in [A_{c3}+(350…400)]$ºС, последующее охлаждение и деформация при $T_д \in [A_{c3} \div A_{c3}+(100…150)]$ºС, деформация сжатием со скоростью $\dot{\varepsilon}=5$ сек$^{-1}$ и степенью деформации $\varepsilon=30\%$, последеформационная пауза $\tau_п \in [20 \div 30]$сек, высокоскоростное охлаждение, отпуск в соответствии с техническими условиями. Отработанные режимы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы термомеханической обработки

Режимы	$T_Д$, °С	$\tau_{подст}$, сек.	$T_{ОТП}$, °С
Сталь 40Х			
№1	900	20	500
№2	900	30	500
Сталь 20Х13			
№3	900	30	500

Исследования тонкой структуры производили с помощью просвечивающего электронного микроскопа FEI Tecnai G^2 30 S-TWIN при ускоряющем напряжении 200 кВ. Плотность дислокаций измеряли по методу секущих. Для получения заготовок тонких фольг брали среднюю часть образцов. Из них вытачивали прутки длиной 10 мм диаметром 3 мм. Выточенные прутки при помощи высокоточного низкоскоростного отрезного станка Struers «Minitom» нарезали на заготовки толщиной 0,7 мм, после чего утоняли на шлифовальной бумаге до толщины 0,1 мм. Тонкие фольги изготавливались методом электролитического утонения в хлорно-спиртовом электролите А-II при напряжении 23 В и температуре

+2°С при помощи установки Struers «Tenupol-5». Для очистки тонких фольг от оксидной плёнки применялась установка ионного утонения Fischione Ion Mill Model 1010.

По результатам изучения тонкой структуры можно заключить, что во всех образцах основной структурной составляющей является реечный мартенсит, представляющий собой параллельные пластины α-фазы шириной 0,08-0,13 мкм. Пластины располагаются параллельно друг другу пакетами и имеют различную ширину. Рейки в пакете разделены малоугловыми границами. Плотность дислокаций в реечном мартенсите находится в диапазоне $(2,5\text{-}3,9)\times10^{14}$ м$^{-2}$. По границам в реечном мартенсите обнаружены карбидные выделения, предположительно цементитные. Такие частицы на границах реек образуются, как правило, при распаде остаточного аустенита в процессе отпуска. Кроме реечного мартенсита в структуре обнаружено около 10% мартенсита самоотпуска и примерно столько же двойникового мартенсита. Мартенсит самоотпуска представляет собой пластины α-фазы шириной 0,8-1,3 мкм, входящие в состав реечного мартенсита и расположенные параллельно рейкам пакета. Они выделяются на фоне остальных реек большей шириной и наличием в них характерных частиц, ориентированных по трём определённым кристаллографическим направлениям. Средний размер частиц самоотпуска составляет 100-180 нм. Плотность дислокаций здесь $(0,9\text{-}1,2)\times10^{14}$ м$^{-2}$, что ниже, чем в реечном мартенсите.

Кроме мартенситной компоненты в структуре встречается нижний бейнит. Ширина пластин нижнего бейнита 0,5-1 мкм, внутри них обнаружены карбидные частицы размером 160-300 нм, расположенные в одном кристаллографическом направлении (примерно под углом 60° к границе рейки), в отличие от карбидов самоотпуска. Кроме этого, карбиды в нижнем бейните располагаются группой, а не распределены равномерно по всему объёму рейки, поэтому для них не приводится объёмная плотность. Ширина их больше, чем ширина карбидов самоотпуска. Плотность дислокаций в нижнем бейните ниже, чем в мартенситной компоненте.

В табл. 2 приведены параметры тонкой структуры исследованных образцов. Принятые сокращения: РМ — реечный мартенсит, МС — мартенсит самоотпуска, НБ — нижний бейнит.

Сравнительный анализ режимов, показывает, что структура стали перлитного и мартенситного класса после отпуска в основном состоит из реечного мартенсита с незначительным содержанием мартенсита самоотпуска. Заметим, что структура образовалась после отпуска, при этом тонкое строении мартенсита унаследовано от деформированного аустенита, образовавшегося в результате динамической рекристаллизации при пластической деформации и статической рекристаллизации при выдержке, о чем свидетельствует примерно одинаковый размер

мартенситных реек. По границам реечного мартенсита и в мартенсите самоотпуска присутствуют карбиды различной степени дисперсности.

Таблица 2. Параметры тонкой структуры образцов

Режим	Характеристика компоненты		Компоненты структуры		
			РМ	МС	НБ
Сталь 40Х					
№1	Объёмная доля, %		80	10	10
	Размер реек (фрагментов), мкм		0,08-0,1	0,8-1	0,5-0,9
	Плотность дислокаций, $\times 10^{14}$ м$^{-2}$		2,9-3,5	0,9-1,2	0,6-0,7
	Карбиды на границах, нм		110	-	-
	Частицы внутри зёрен	Размер, нм	-	180	160
		Об.плотн., $\times 10^{20}$м$^{-3}$	-	0,7-0,9	-
№2	Объёмная доля, %		70	10	20
	Размер реек (фрагментов), мкм		0,12-0,13	0,8-1,3	1
	Плотность дислокаций, $\times 10^{14}$ м$^{-2}$		2,6-2,8	1,2-1,6	1,5-1,7
	Карбиды на границах, нм		40	100	-
	Частицы внутри зёрен	Размер, нм	50	40	300
		Об.плотн., $\times 10^{20}$м$^{-3}$	-	2,5-3,5	-
Сталь 20Х13					
№3	Объёмная доля, %		90	10	-
	Размер реек (фрагментов), мкм		0,15	1,5	-
	Плотность дислокаций, $\times 10^{14}$ м$^{-2}$		2,5-2,7	1,9-2,2	-
	Карбиды на границах, нм		50-500	50-500	-
	Частицы внутри зёрен	Размер, нм	-	100	-
		Об.плотн., $\times 10^{20}$м$^{-3}$	-	2,8-3,4	-

Увеличение длительности выдержки при температуре окончания деформации до 30 сек. приводит к уменьшению размера карбидов по границам в реечном мартенсите, образовавшихся в процессе отпуска с 110 нм до 40 нм. Отметим, что карбидные частицы образуются при отпуске

на границах реек на месте прослоек остаточного аустенита. С ростом времени выдержки с 20 до 30 сек. происходит изменение плотности дислокаций, что связано с перераспределением структурных единиц между реечным мартенситом и мартенситом самоотпуска. При этом уровень плотности дислокаций, который можно охарактеризовать как высокий, сохраняется после деформации аустенита. С ростом времени выдержки объемная плотность карбидной фазы внутри мартенсита самоотпуска увеличивается. Все это говорит о прохождении начальной стадии статической рекристаллизации во время последеформационной выдержки. При этом выдержка равная 30 сек. обеспечивает формирование в стали более сбалансированной и стабильной тонкой структуры. На рис. 1 представлена характерная структура стали 40Х при различных режимах ПТМО.

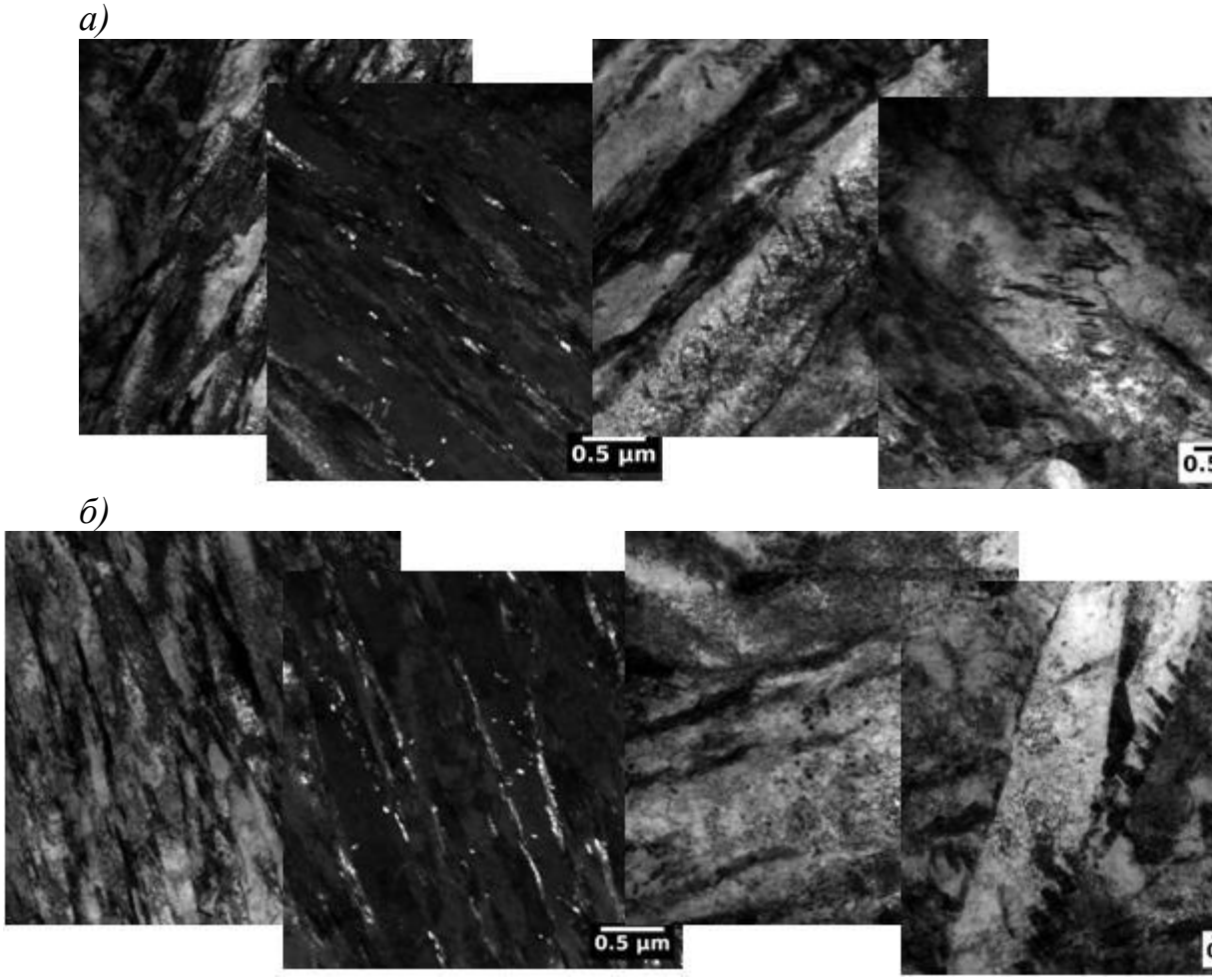


Рис.1. Тонкое строение стали 40Х после ПТМО: а) время выдержки после деформации 20 сек. б) время выдержки после деформации 30 сек.

Выводы

В рамках технологического процесса термомеханической обработки в интервале температур деформирования $(0.6 \div 0.7)T_{пл}$ на внутрикристал-

литном уровне происходит насыщение тонкой структуры дисперсными частицами дислокационно-дефектной природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.А., Колбасников Н.Г., Соколов Д.Ф., Соколов С.Ф. Моделирование микроструктуры и механических свойств стального листа после прокатки на стане 2000 ОАО «Северсталь» // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 3 (63). – с. 16−27.
2. Васильев А.А., Колбасников Н.Г., Соколов С.Ф., Соколов Д.Ф., Хлусова Е.И. Экспериментальное исследование и моделирование кинетики статической рекристаллизации трубных сталей // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 3 (63). – с. 64−74.
3. Радкевич М.М. Технология деформационно-термической обработки. – 2003.
4. Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. Влияние последеформационной паузы на структуру поковок при полугорячей термомеханической обработке // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Международной научно-практической конференции. / Под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С.645-650.
5. Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. Физическое моделирование технологического процесса полугорячей штамповки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2012. – №1. – с.143-146.

СТАНКОСТРОЕНИЕ

УДК 378.147

М. С. Бундур, Н. А. Пелевин, В. А. Прокопенко

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ-СТАНКОСТРОИТЕЛЕЙ



Михаил Семенович Бундур, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Санкт-Петербург, Россия. Тел.: +7(812)534-1388,
E-mail: mmfgak@mail.ru.



Никита Александрович Пелевин, аспирант
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Санкт-Петербург, Россия. Тел.: +7(812)534-1388,
E-mail: twic@inbox.ru.



Вячеслав Алексеевич Прокопенко, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Санкт-Петербург, Россия. Тел.: +7(812)534-1388,
E-mail: mmfgak@mail.ru.

Аннотация

В работе приведены особенности учебного процесса в части расчетов, проектирования и исследования узлов и систем станочного оборудования. Рассмотрены различные аспекты, связанные с применением программного обеспечения для тех или иных задач в рамках выполнения работ статического и динамического характера. Приведены методики и результаты внедрения и использования определенных программных продуктов на практике кафедры «Станкостроение».

Ключевые слова: программный пакет, динамические характеристики, физико-математическая модель, моделирование, частотные характеристики, станок

M. S. Bundur, N. A. Pelevin, V. A. Prokopenko

FORMATION OF INFORMATION CULTURE OF STUDENTS IN THE STUDY OF PROFESSIONAL DISCIPLINES

Dr.Mihail S. Bundur[1], e-mail: mmfgak@mail.ru;
Nikita A. Pelevin[1], e-mail: twic@inbox.ru;
Dr. Vyacheslav A. Prokopenko[1], e-mail: mmfgak@mail.ru.
[1]St.Peterburg Politechnical University, Russia

Abstract

Educational process peculiarities in part of units and systems of machining facilities calculating, designing and investigation are presented in the work. Various aspects deal with software using for those or other problems in the network prosecution static and dynamic character are shown. Procedures and implementation and using results of special software in practice of "Machine-building" department are given.

Key words: Software package, dynamic characteristics, physical and mathematical sample piece, simulation, frequency characteristics, the machine tool.

В настоящее время использование компьютеров в научных исследованиях позволяет моделировать сложные структуры, управлять процессами и экспериментами. При этом учебный процесс должен быть ориентирован на то, что студент-станкостроитель осваивает навыки не только расчета и конструирования узлов станка, разработки технологии по изготовлению отдельных его деталей, исследования, а так же разработку узлов до момента их непосредственного изготовления на производстве с оценкой статических и динамических возможностей оборудования.

Оценка качества разрабатываемого станка обеспечивается расчетом и исследованием прежде всего его динамических показателей. В частности большое влияние на динамику станка оказывают его важнейшие узлы, такие как главный привод и шпиндельный узел (ШУ). Для ШУ изготовленного с применением гидростатических подшипников (ГСП), возможно, как и для практически любой гидравлической и пневматической системы, произвести компьютерное моделирование процесса управления в ГСП.

В практике станкостроения часто используют широко известные методики теории колебаний, теории устойчивости, теории автоматического управления. Модель ГСП может рассматриваться по ее физико-математическому описанию системой дифференциальных уравнений как система автоматического регулирования (САР).

Достаточно удобно в процессе проектирования оценку динамических показателей САР производить на основании линейного анализа логарифмических амплитудно-частотных (ЛАЧХ), фазочастотных (ЛФЧХ) характеристик и переходных процессов (ПП) математической модели САР ГСП. Частотные характеристики модели линейной САР позволяют количественно и качественно судить о ее динамических характеристиках. Также эти характеристики позволяют оптимизировать параметры и структуру САР

для получения требуемых ее свойств. Анализируя частотные характеристики системы можно установить степень ее устойчивости и определить возможности повышения динамического качества САР.

В инженерной практике, как отмечено выше, методы анализа и синтеза динамических систем, основанные на исследовании ЛАЧХ и ЛФЧХ, относятся к исследованию линеаризованных систем. Для упрощения анализа проводится линеаризация исходной модели нелинейных уравнений [1] разложением в ряд Тейлора в окрестностях начальной точки пространства, далее преобразования по Лапласу линеаризованной системы, с последующим переходом к операторной форме записи уравнений и введения обозначений коэффициентов и постоянных времени.

Построение графиков ПП следует выполнять как для нелинейной (исходной), так и линеаризованной (линейной) модели. При этом, для исследования линеаризованной модели допускается использование только малых возмущающих воздействий, что соответствует для станка чистовой обработке детали.

Для оценки динамики поведения с учетом нелинейности САР при больших нагрузках должна использоваться модель, соответствующая исходной системе нелинейных дифференциальных уравнений [1]. Нелинейность уравнений САР ГСП оказывает существенное влияние на ее поведение при различных (особенно максимальных) значениях нагрузки (колебательность при больших нагрузках существенно снижается), что и определяет производительность обработки на станке.

В учебном процессе студенты для исследования динамического качества САР станков могут использовать современные программные продукты: «SamSim», «МВТУ», «Mathcad», «MATLAB» и др. Однако их возможности по разным причинам не являются одинаковыми.

«SamSim» имеет достаточно гибкую систему построения структурных схем, но полученные данные не отличаются большой точностью. Программа не позволяет произвести построение частотных характеристик (ЧХ) для структур с перекрещивающимися связями (определяет их как обратные связи), настройка параметров вывода данных в программе неудобна. Возможность построения нелинейных физико-математических моделей затруднена, так как необходимо проводить сложные преобразования исходной модели нелинейных уравнений. Обработку полученных результатов необходимо производить в другом программном продукте (например: «Excel», «Mathcad»). Кроме того, «SamSim» не изучается студентами в СПбГПУ и по нему отсутствуют доступные готовые методические материалы.

Программа динамического моделирования «МВТУ» ориентирована в основном на исследование и расчет динамики сложных систем, содержит ограниченное число типовых динамических звеньев по сравнению с «SamSim». Имеются дополнительные сложности для расчета и построения

ЧХ – в структурной схеме требуется произвести ряд дополнительных действий (необходимо разомкнуть систему, установить ее вход и выход, произвести настройки параметров и условий расчета). Существенно, что в этом пакете отсутствует возможность расчета и исследования нелинейных моделей САР. Однако, «МВТУ» имеет такие расчетные возможности, как: обрабатывает перекрещивающиеся связи, при моделировании не требует наличие передаточной функции САР, ее определенного вида и вывода ее из структурной схемы. В течении ряда лет данный пакет используется на кафедре «Станкостроение» студентами для решения задач по «Теории автоматического регулирования», НИРС и курсовому проектированию. Написан лабораторный практикум [2], в котором изложены основы работы с программой и приведен ряд лабораторных работ, что позволяет освоить «МВТУ» на необходимом для студентов-станкостроителей уровне, так как по учебному плану ее изучение также не предусмотрено. Кроме того, в последнее время данный пакет использовался на кафедре для проведения исследований, с помощью которых был получен ряд существенных новых результатов [3, 4].

Такая программная система общего назначения, как «Mathcad» позволяет производить алгебраические вычисления, решение уравнений и систем уравнений (как алгебраических, так и дифференциальных), обработку данных (в векторном, табличном и матричном виде) и т.д., а также обладает развитыми средствами графической интерпретации данных (позволяет строить трехмерные поверхности, годографы и. т.д). «Mathcad» можно использовать для решения различных специальных задач (например: исследование нелинейных физико-математических моделей), но для этого требуются знания и навыки программирования. Данный пакет изучают в процессе решения задач и курсовом проектировании по «Теории механизмов и машин». На кафедре «Станкостроение» «Mathcad» используется как базовый продукт для решения общих и частных задач, на его основе разработан ряд программ, описание которых дано в упомянутом лабораторном практикуме [2], однако имеются задачи, где его применение является сложным с точки зрения программирования (например, моделирование САР «дроссель-регулятор», «насос-карман-регулятор» и т.д.), поэтому он не всегда удобен и доступен в применении.

В большинстве своем студенты на достаточном уровне знаниями и навыками программирования не обладают. Возникает проблема организации учебного процесса: либо учить студентов основам, особенностям и умениям программирования, либо использовать программный продукт, в таком виде, в котором для целей проектирования и исследований станочных систем глубокие знания программирования не требуются.

Такой удобной программой является «MATLAB», имеющий встроенную визуальную среду моделирования «Simulink». «Simulink» – это интерактивная система для решения широкого класса динамических задач.

«Simulink» обладает рядом достоинств: работает с линейными и нелинейными, непрерывными и дискретными, многомерными и другими данными и системами. При этом реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, из различных разделов библиотеки стандартных блоков Simulink Library Browser (рис. 1) создается модель на основе исходной структурной схемы либо системы дифференциальных уравнений. Группируя, в соответствии с исходным уравнением, блоки в подсистемы, можно создавать любую иерархическую модель (для примера на рис. 2 приведена одна из возможных структурных схем ГСП с правлением на базе дросселя, используемая в обучении студентов на кафедре «Станкостроение»), которая состоит из моделей более низкого уровня рис. 3. Такая модель удобна тем, что в процессе моделирования можно разбивать исходное дифференциальное уравнение [1] на отдельные модели, которые объединяются в блоки Subsystem (например, на рис.3 показан стрелками переход от модели высокого уровня, которая содержит блок с моделью более низкого уровня). Число блоков и связей в модели неограниченно. «Simulink» обладает открытой архитектурой и позволяет развивать среду моделирования, создавая собственные блоки и библиотеки блоков с доступом из программ на MATLAB, Fortran или C++.

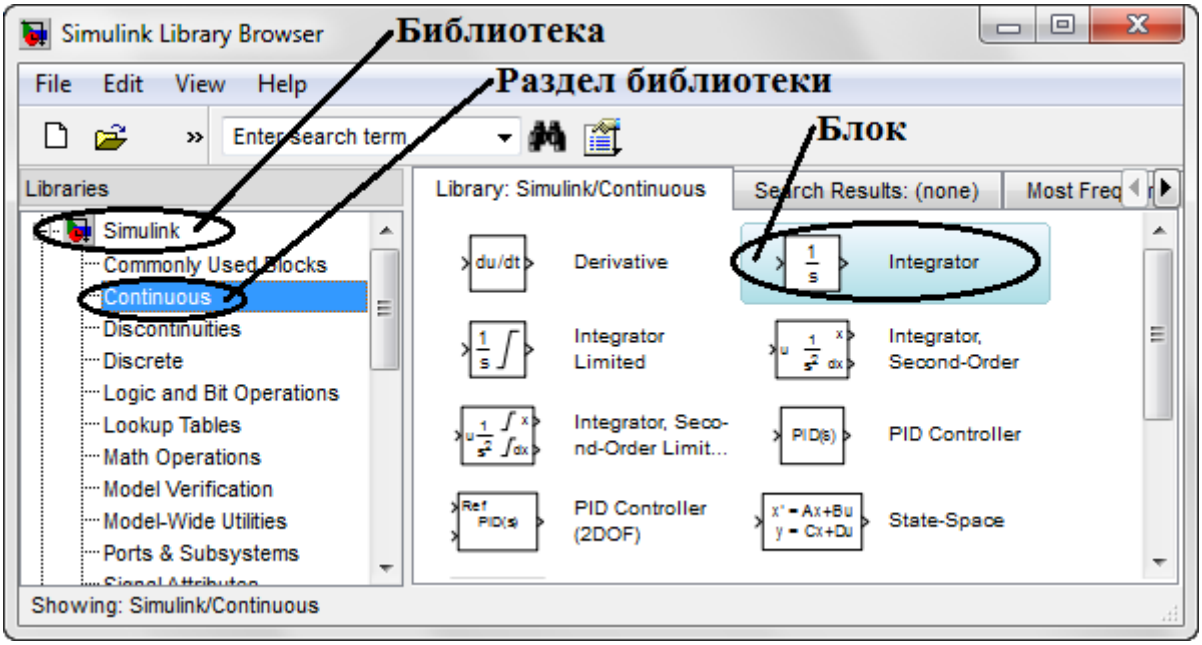


Рис. 1. Интерфейс библиотек Simulink

Среда «Simulink» позволяет осуществлять расчеты как ПП, так и ЧХ. При моделировании можно выбирать метод решения, а также способ изменения модельного времени. В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные «устройства» наблюдения, такие как блоки Scope (график) и

Display (цифровой индикатор), входящие в состав библиотеки Simulink Library Browser. Результаты моделирования удобно обработать прямо в окне их вывода, для этого используются встроенные инструменты, такие как: Peak Response (максимальная амплитуда); Setting Time (время ПП); Steady State (установившееся значение ПП); Gain Margin (запас по амплитуде); At frequency (частота среза ЛФЧХ); Phase Margin deg (запас по фазе); At frequency (частота среза ЛАЧХ). При помощи «Simulink» можно выполнять самые разные, в отличии от выше упомянутых пакетов, расчеты и исследования.

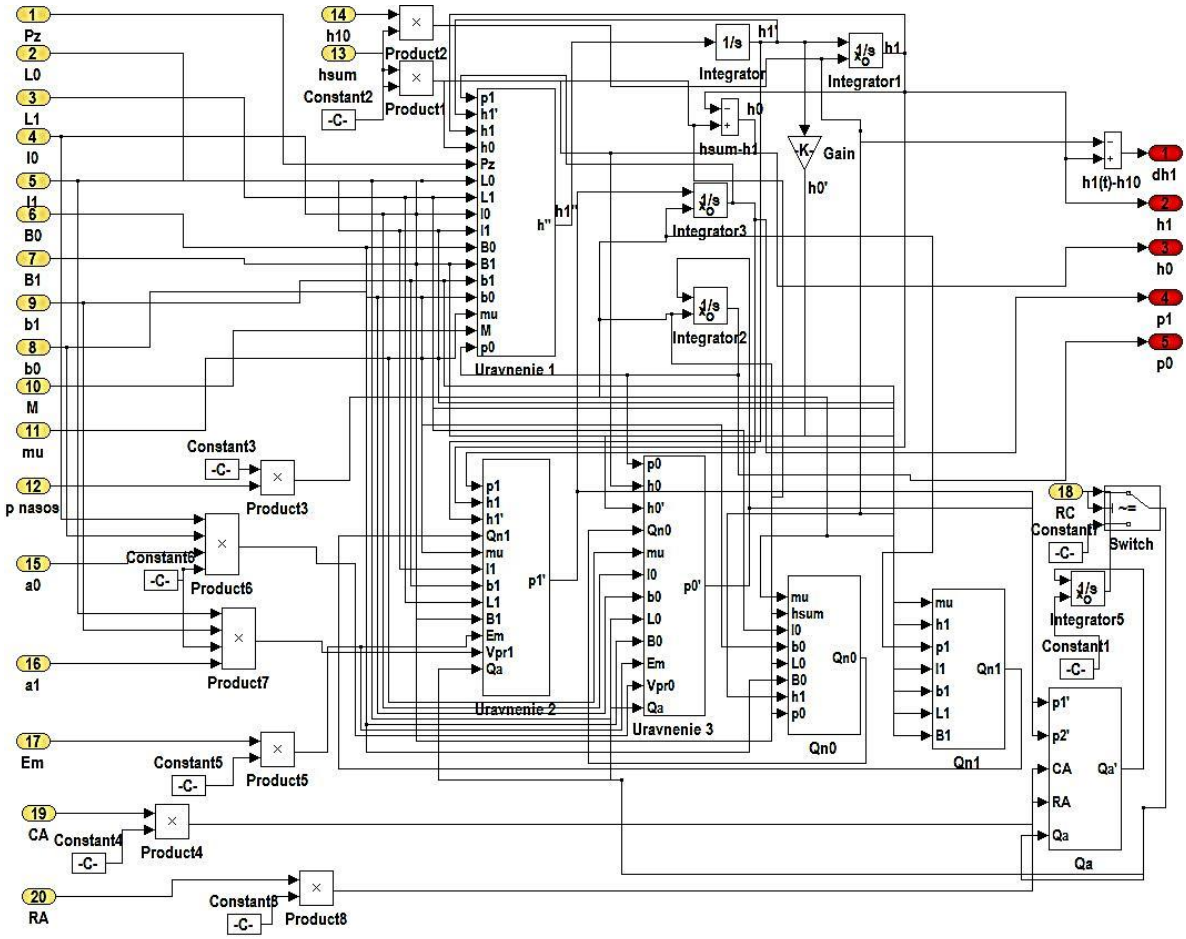


Рис. 2. Структурная схема ГСП в «MATLAB Simulink»

На кафедре «Станкостроение» разработан ряд моделей [5, 6, 7] в среде «Simulink», при помощи которых проводятся расчеты и исследования динамики станочных систем.

В дополнении к этим моделям, был выполнен интерфейс (модель на рис. 3 более высокого уровня), имеющий блоки ввода исходных данных и блоки вывода результатов моделирования, и подготовлены соответствующие методические указания, которые в простой и понятной форме поясняют студентам как правильно пользоваться и работать с моделями, при выполнении заданий по ряду учебных дисциплин. Это позволило упро-

стить работу студентам с использованием этих моделей, и от них не требуется самим программировать модели в среде «Simulink».

Преподаватель выдает студенту задание (вариант, содержащий исходные параметры для ввода в интерфейс), в соответствии с которым, он заполняет каждый из блоков ввода, параметрами из своего задания. По результатам моделирования он должен сделать выводы о качестве системы САР и улучшить ее динамику.

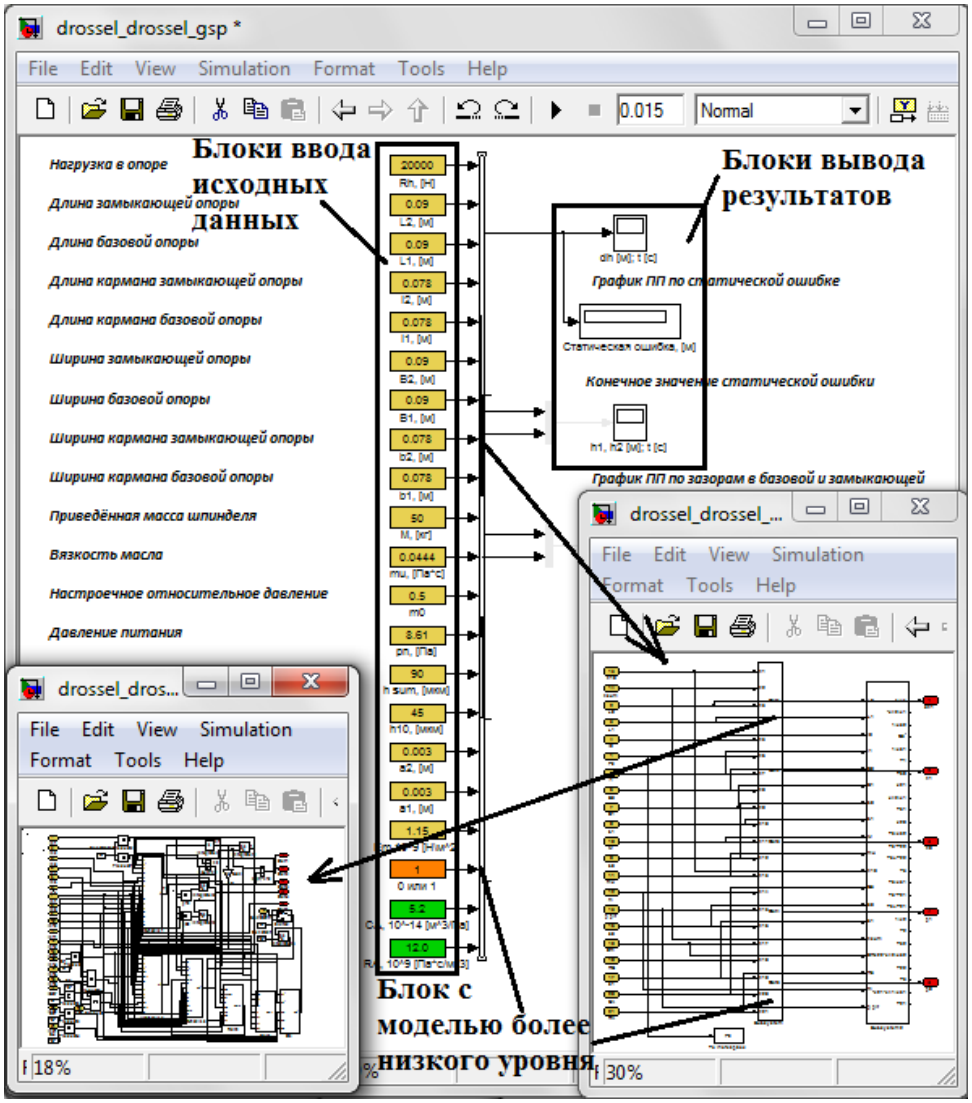


Рис. 3. Нелинейная иерархическая модель

Результаты моделирования, получаемые при использовании разработанных моделей, позволяют оперативно и в максимальном объеме как количественно, так и качественно получить значения основных динамических расчетных параметров СУ, сопоставить варианты в соответствии с конкретным заданием и выбрать оптимальное решение для поставленной задачи.

Настроить «MATLAB» для работы с моделями достаточно просто: для этого необходимо в стартовом окне «MATLAB» указать текущую директорию (путь к папке) рис. 4, содержащую эти модели. При этом в текущей папке рис. 4 будут выведены все доступные программы и модели.

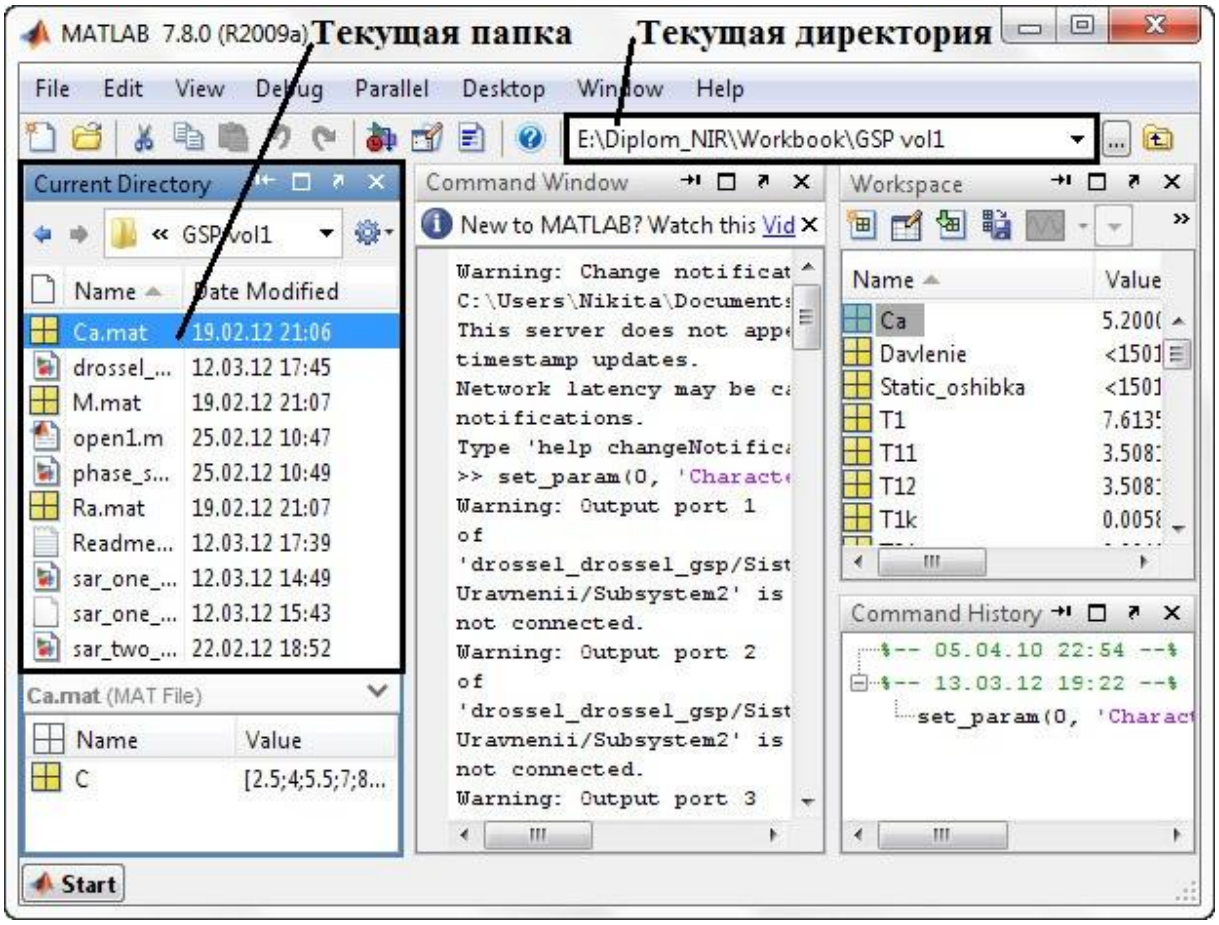


Рис. 4. Стартовое окно «MATLAB»

Разработанные методические указания и модели можно рекомендовать для более широкого проведения исследовательских работ студентами, курсового и дипломного проектирования, в рамках учебной и научно исследовательской работы, различных практических заданий (например: по практической части курса «Теории автоматического управления»), НИРС, НИОКР и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

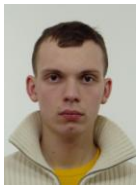
1. М.С. Бундур, В.А. Прокопенко, И.А. Чернов. Повышение впброустойчивостп процесса резания путем улучшенпя динамических характеристик шпиндельных гидростатических подшипников // Металлообработка. - 2009. - № 1(49). - С. 10-15.

2. Теория автоматического управления: лабораторный практикум/ М.С. Бундур, О.С. Кузнецова, В.А. Прокопенко, И.А. Чернов – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. - 48с.
3. В.А. Прокопенко, И.А. Чернов. Динамика шпиндельных гидростатических подшипников при использовании схемы управления с регуляторами // Теория механизмов и машин. – 2007. – № 1. – С. 45-50.
4. М.С. Бундур, В.А. Прокопенко, И.А. Чернов. Возможности схемы управления «насос-карман» в станочных гидростатических подшипниках // Теория механизмов и машин. - 2008. - № 2. - С. 91-99.
5. Н.А. Пелевин, М.С. Бундур. Применение системы «MATLAB SIMULINK» для проведения исследований гидростатических подшипников // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции.– СПб., 2012. – Ч.4: Механико-машиностроительный факультет / [под ред. М. М. Радкевича, М.С. Кокорина] .– С. 27-29.
6. Н.А. Пелевин, П.Ю. Пискарев, В.А. Прокопенко. Исследование и анализ возможностей различных систем управления для шпиндельных гидростатических подшипников тяжелого расточного модуля // Научно-технические ведомости СПБГПУ. Наука и образование.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. - 2012. - №2(174). – С. 85-91.
7. Н.А. Пелевин, В.А. Прокопенко. Моделирование динамических процессов прецизионных шпиндельных опор металлорежущего оборудования в программном пакете MATLAB // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Лучшие доклады.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 53-56.

УДК 62-523.8

И.С. Картавцев

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УЧПУ ТОКАРНОГО СТАНКА ПО РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПОДНАЛАДКИ ОБОРУДОВАНИЯ



Иван Сергеевич Картавцев, аспирант
Тульский Государственный университет
пр. Ленина, 92, Тула, 300012, Россия.
Тел.: 8 (4872) 23-95-39, E-mail: ivan_2la@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены основные аспекты, возникающие при проектировании дополнительного модуля, включаемого в УЧПУ открытого типа автоматизированного оборудования, с целью расширения её функциональных возможностей по расчету параметров процесса текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ, осуществляемого по методу контрольной карты, в режиме реального времени.

Ключевые слова: дополнительный модуль, контрольная карта, текущий контроль, подналадка.

I. S. Kartavtsev

EXTENDING NC LATHE IN-PROCESS MONITORING PARAMETERS EVALUATION AND ADJUSTMENT CAPABILITIES

Ivan S. Kartavtsev, e-mail: ivan_2la@mail.ru.
Tula State University, Russia

Abstract

The paper considers primary aspects of designing an add-on module for an open NC controller which extends its capabilities by introducing real-time in-process monitoring parameters evaluation (control charts-based) and the NC machine tool adjustment capabilities.

Key words: add-on module, control chart, in-process monitoring, adjustment.

Новое поколению систем управления станком типа PCNC (Personal Computer Numerical Control) с открытой архитектурой позволяют внедрять новую технологию объектно-ориентированного программирования направленную на решение новых технологических и управленческих задач.

Открытая архитектура систем ЧПУ типа PCNC посредством расширения собственных функциональных возможностей предоставляет решать новые исключительно важные задачи, к которым можно отнести: возможность конфигурирования системы непосредственно на предприятии потребителе использующем оборудование, а не у станкопроизводителя; возможность встраивания коммерческих программных пакетов; возможность доступа к информации о состояниях любого программного модуля системы, а также к диагностической информации аппаратуры, приводов и управляемого объекта в целом [8].

На практике чаще всего используется вариант построения системы ЧПУ типа PCNC с общей аппаратно - программной шиной, которая обеспечивает быструю и согласованную межмодульную коммуникацию в системе УЧПУ, реализуемой в виде объектно-ориентированной магистрали поддерживающей программно-аппаратные коммуникационные протоколы, а кроме этого благодаря специальной объектно-ориентированной оболочке выполняющей прикладные серверные функции по обслуживанию поступающих запросов, как из внешней среды, так и от подключенных к системе модулей [7].

Все модули, подключенные к общей объектно-ориентированной магистрали или шине, запрашивают данные одним возможных способов: синхронным, асинхронным или по их событию. При этом способ выдачи запроса в систему зависит от решаемой задачи, а обработка того или иного запроса выполнятся в соответствии с иерархической системой.

В настоящее время наиболее сложные системы ЧПУ с открытой архитектурой типа PCNC, устанавливаемые на многокоординатные обрабатывающие центры, реализуют по принципу двухкомпьютерной архитектурной модели, хотя существующие тенденции направлены на отдачу предпочтения в данной области управления производственными процессами однокомпьютерным архитектурным вариантам. Оба рассматриваемых варианта архитектурных решений УЧПУ станка предполагают в себе наличие PC и NC подсистем.

Двухкомпьютерная модель предполагает размещение обеих подсистем на разных компьютерах, объединенных единой коммуникационной средой с протоколами обмена данных TCP/IP включение в которую некоторого прикладного уровня с функциями доступа к интерфейсам модулей расширения создает так называемую виртуальную шину, предоставляющую низкоуровневые услуги доступа по запросу от подключаемого модуля. Верхним иерархическим звеном является объектная надстройка над

виртуальной шиной, формирующая единый для обеих подсистем глобальный сервер – объектно-ориентированную магистраль.

Однокомпьютерная модель предполагает наличие только одного PC компьютера, оснащенного дополнительными специальными платами для подключения управляемых контроллеров, в числе которых может быть, например, контроллер приводов подачи, контроллер привода инструментального механизма или другие специальные устройства для управления контролируемым технологическим процессом и т.д. В этом случае нижним уровнем системы является компьютерная аппаратура, на уровень выше располагается операционная система вместе с клиент-службами, обеспечивающими управление внешними устройствами [10].

Оба архитектурных варианта открытой архитектуры УЧПУ позволяют производить: легкое разделение между прикладными, системными и коммуникационными компонентами; возможность их независимой модернизации, как на основе оригинальных программных продуктов, так и путем включения в систему коммерческих программных систем; иерархическую клиент-серверную организацию взаимодействия между подсистемами, а так же стандартизацию интерфейсов обмена данных.

Объектно-ориентированный подход к решению поставленных задач на уровне макропроектирования системы позволяет подключать новые прикладные модули. При этом, каждый объект-модуль является, как правило, сложной объектно-ориентированной структурой и отражает глобальный объектно-ориентированный подход при проектировании системы управления в целом, а отношения между объектами организуют по клиент-серверной схеме

При этом, каждый объект-модуль является не просто вычислительным элементом, а сложной объектно-ориентированной структурой и отражает в своем устройстве совокупный объектно-ориентированный подход при проектировании, структурировании и функционировании системы управления в целом [6].

Разработка подобного модуля расширения функциональных возможностей УЧПУ открытого типа с целью расчета и оптимизации параметров процесса текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ, осуществляемого по методу контрольной карты, в режиме реального времени позволит учесть влияние основных факторов процесса резания на параметры процесса текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ, специфику современного станочного оборудования, а так же добиться снижения затрат на осуществление анализируемого процесса.

Для этого необходимо определить грамотно сформулировать технологическую задачу, для решения которой создается проектируемый модуль, т.е. определить выходные параметры функциональной системы в рамках которой должен работать данный модуль, после чего необходимо определить причины препятствующие её достижению т.е. входные параметры. В

рассматриваемом случае выходными параметрами являются параметры используемой контрольной карты. Входными параметрами или “препятствием” для решения поставленной задачи (определения параметров КК) являются колебание стойкости режущего инструмента, материала, неравномерность износа резца при его работе [5].

Для достижения необходимого качества управления процессом текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ необходимо выполнить его структурно-функциональную декомпозицию на блоки, отражающие основные аспекты жизненного цикла изделия.

Структурно-функциональная модель процесса обработки изделия в машиностроении, в виде диаграммы IDEF0, представлена на рис. 1. В результате структурно-функциональной декомпозиции установлено, что разрабатываемый модуль должен обеспечивать получение оптимальных параметров используемой контрольной карты, по которой производится текущий контроль и подналадка станка с ЧПУ, в режиме реального времени. Входными данными для проектируемого блока будут значения размеров получаемых деталей, износ резца при этом и его наработка на отказ. Определение оптимальных параметров контрольной карты ведется в соответствии с выбранным в [2] экономическим критерием оптимизации.

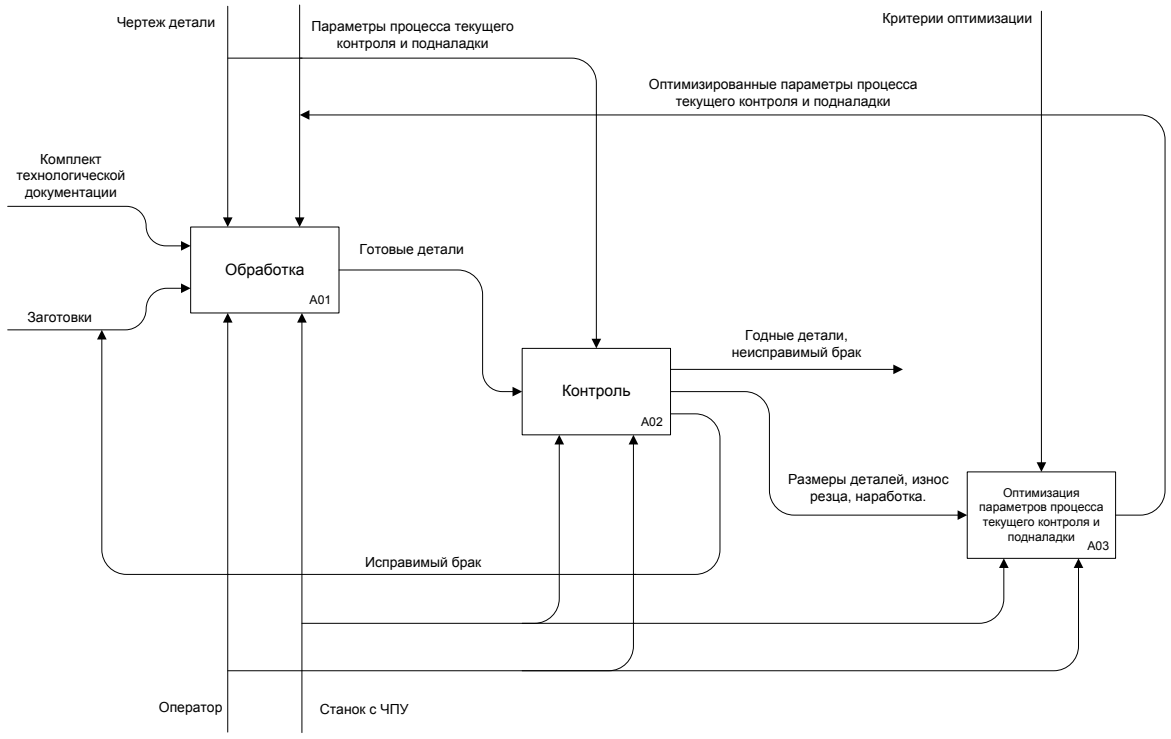


Рис. 1. Структурно-функциональная модель процесса обработки изделия в машиностроении

Согласно модели, например, произошло изменение требований по

шероховатости к готовой продукции, при этом широко известно, что шероховатость поверхности в основном определяется величиной оборотной подачи, с которой производится обработка. При этом происходит измерение режимов резания, а соответственно изменение комплекта технологической документации на обработку, а так же стойкости инструмента. Это улавливается системой в блоке А03, где производится коррекция параметров контрольной карты, по которой производится текущий контроль и подналадка станка с ЧПУ.

Таким образом, разработанная структурно-функциональная модель позволяет отслеживать изменение как внутренних, так и внешних параметров процесса получения готовых деталей адекватно реагировать на них с целью определения оптимальных параметров процесса текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ.

В большинстве примеров рассматриваемых в научной литературе для определения выходных параметров в проектируемом модуле используются математические модели, полученные в результате статистической обработки экспериментальных данных.

Для получения точных математических моделей связывающих изменения условий обработки (разброс стойкости инструмента) и параметры контрольной карты используемой при этом может быть предложен метод самообучения или адаптации параметров модели с их одновременной оптимизацией по экономическому критерию.

Разрабатываемый модуль, включаемый в УЧПУ станка, должен обеспечивать: 1) математическую обработку и анализ данных полученных в ходе проведения как сплошного контроля деталей в начале работы, так и выборочного в процессе обработки последующих партий, для получения точной математической модели; 2) хранение и использование полученных результатов для управления процессом резания; 3) адаптивное управление процессом подналадки станка на основе математических моделей, уточняемых при поступлении новых данных.

Включение разрабатываемого модуля в УЧПУ станка возможно только при наличии открытой архитектуры самой УЧПУ. Так как конечным продуктом (видимым оператором) является интерфейс программы то реализация включения разрабатываемого модуля в УЧПУ станка возможна в двухвариантном исполнении:

1) Включение разрабатываемого модуля непосредственно в УЧПУ.

2) Связь разрабатываемого модуля с УЧПУ станка по дискретному каналу.

Первый вариант исполнения более предпочтителен т.к. не требует дополнительных вычислительных мощностей, а использует ЭВМ станка. Кроме этого это упрощает восприятие программного продукта т.к. включение окна программы в стойку управления оборудованием позволяет добиться более «дружественного к пользователю» человеко-машинного ин-

терфейса, а так же позволяет производить коррекцию управляемого с его помощью параметра прямо на рабочем месте.

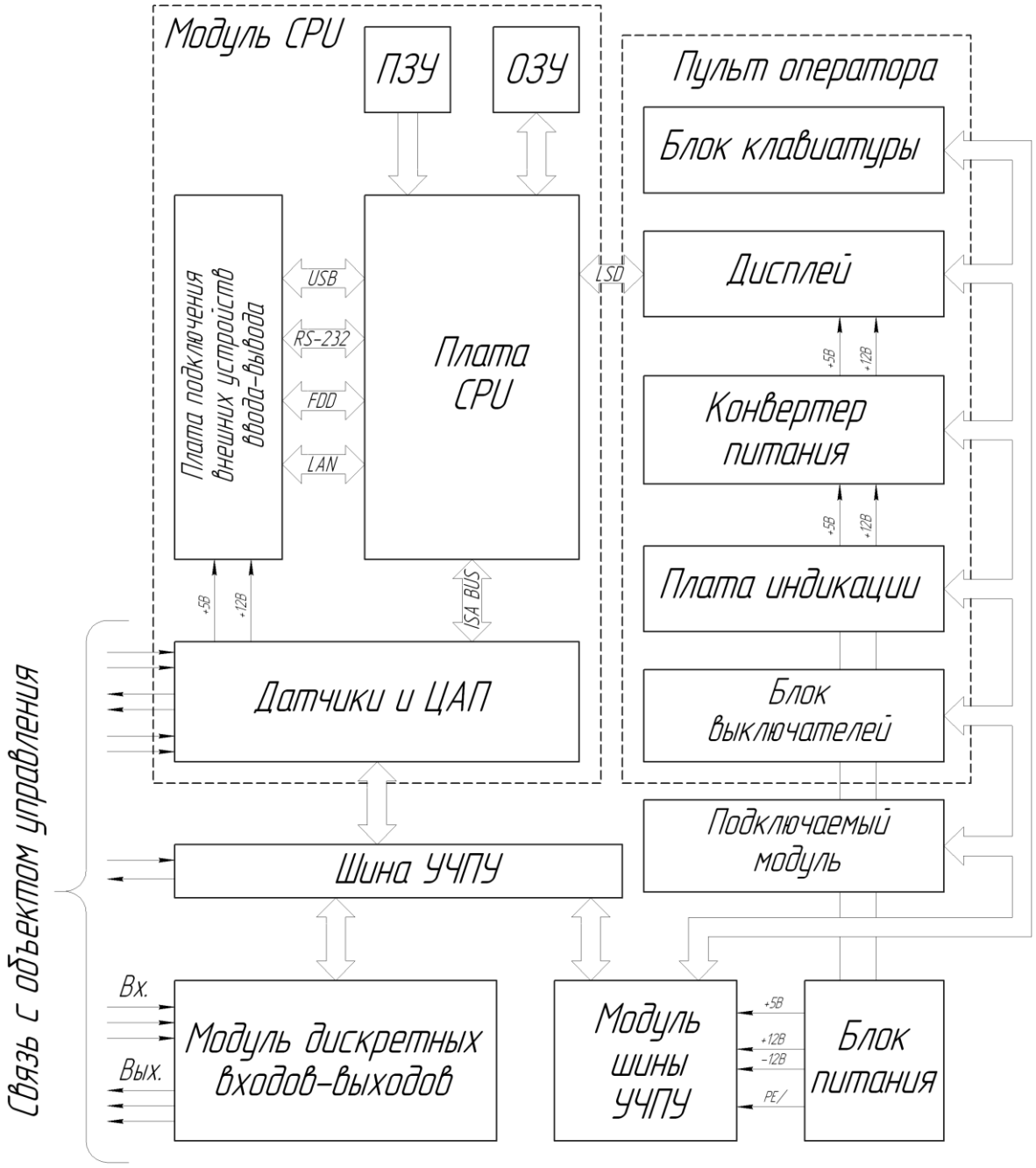


Рис. 2. Структурная схема УЧПУ NC-210 с включенным дополнительным модулем по расчету параметров процесса текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ.

Применение данного варианта может потребовать использование дополнительных плат расширения, которые вставляются в основную плату УЧПУ (или в материнскую плату, если УЧПУ выполнено на базе IBM ЭВМ) и увеличивают количество дискретных и аналоговых входов выхо-

дов для обеспечения связи с управляемым контроллером или управления контролируемым параметром.

Второй вариант исполнения является более трудоемким т.к. требует дополнительных вычислительных мощностей, но в случае управления процессом текущего контроля и подналадкой станка с ЧПУ на большом количестве станков одновременно позволяет синхронизировать данный процесс для достижения непрерывности обработки в конечном итоге ещё большего снижения себестоимости продукции.

Включение разрабатываемого модуля в УЧПУ токарного станка модели NC-210 по первому варианту показано на рис.2 [9]. Как видно из рисунка дополнительный модуль сопрягается с шиной УЧПУ станка через модуль шины. К шине УЧПУ подключены все её блоки, в том числе и CPU системы. Ввод информации и отображение информации осуществляется одновременным сопряжением клавиатуры и дисплея стойки УЧПУ к общей шине. При этом блок шины используется как буфер, выдающий информацию на общую магистраль по мере поступления запросов в систему в соответствии с иерархической структурой.

При управлении процессом текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ с целью определение текущего значения линейного износа резца возможно использование измерительной системы станка. Это позволяет наилучший момент для коррекции размерной настройки станка или замены инструмента.

Представление системы автоматической коррекции размерной настройки станка, в составе которой должен функционировать проектируемый модуль по управлению процессом текущего контроля и подналадкой станка с ЧПУ, использующей измерительную систему станка в виде структурной схемы (рис. 2) позволяет проанализировать прохождение сигнала через элементы схемы и допускает хорошую физическую интерпретацию процессов, протекающих внутри неё.

Существо работы проектируемого модуля поясняет блок схема, приведенная на рис. 3.

Поясним некоторые блоки этой схемы:

В блоке №1 производится ввод исходной информации. Например, параметров функции $Y(t)=\varphi(t)$, определяющей величину износа резца в зависимости от наработки после последней подналадки, в случае, если определение износа резца после обработки очередной детали будет осуществляться аналитическим способом.

В блоке №2 производится обработка детали или моделирование обработки в случае использования аналитического метода.

В блоке №3 производится определение текущего значения износа резца l, о величине которого судят как по размеру готовой детали или по значению функции $Y(t)$.

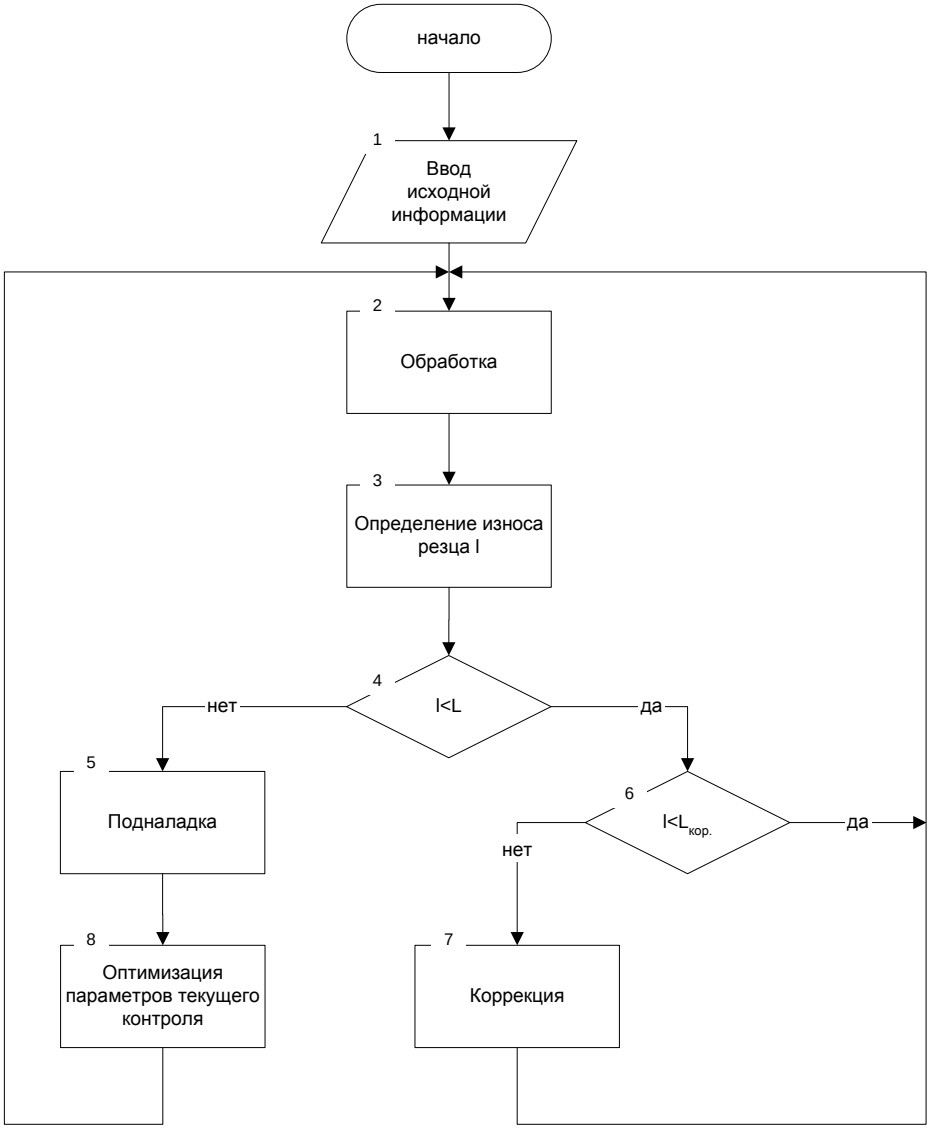


Рис. 3. Блок схема работы разрабатываемого модуля расширения функциональных возможностей УЧПУ станка

В блоке №4 производится сравнение текущего значения износа резца l с максимально допустимым значением износа резца L.

Если текущий износ больше максимального (блок №5), то производится подналадка оборудования, если же наоборот, то значение текущего износа сравнивают с значением износа резца при котором должна производится коррекция станка l_{kor}. (блок №6).

Если $l<l_{kor.}$ То производится обработка очередной детали (блок №2). Если же $l>l_{kor.}$ то производится коррекция размерной настройки станка с ЧПУ (Блок №7) и обрабатывается новая деталь.

В блоке №8 после произведенной подналадки оборудования производится коррекция функции *Y(t)*, в случае, если определение износа резца после обработки очередной детали будет осуществляется аналитическим

способом, а так же определение и корректировка параметров используемой контрольной карты согласно которой производится текущий контроль и подналадка станка с ЧПУ.

Работа проектируемого блока согласно данной блок схемы позволит учесть изменения в стойкости режущего инструмента, а также целого ряда других параметров процесса резания, а его включение в УЧПУ станка позволит обеспечить быстрое, точное и достаточно простое определение параметров контрольной карты в режиме реального времени что снизит затраты на процесс текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ, а в конечном итоге снизит себестоимость готовой продукции [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Картавцев И.С. Моделирование процесса подналадки станка с ЧПУ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. № 2. – Тула: ТулГУ, 2012. – С. 282 – 292.
2. Картавцев И.С. Адаптивная оптимизация процесса текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Вып. №3. Ч. 3 – Орел: ГУНПК, 2012. – С. 135 – 144.
3. Клепиков В.И., Сосонкин В.Л. Принцип подчиненного управления в логических системах управления // Приборы и системы управления, 1995, #12, с. 16-18.
4. Мартинов Г.М., Сосонкин В.Л. Принципы построения систем ЧПУ с открытой архитектурой // Приборы и системы управления, 199б, #8, с.18-21.
5. Пасько Н.И., Картавцев И.С. Математическая модель контроля размерной настройки станка с ЧПУ по методу контрольной карты // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск №2. – Тула: ТулГУ, 2012. – С. 292 – 301.
6. Петрешин Д.И. Разработка и создание самообучающейся технологической системы с адаптивным управлением параметрами качества поверхностного слоя деталей машин: дис. … док. тех. наук: 05.02.08, 05.13.06: защищена 19.10.10. / Петрешин Дмитрий Иванович. – Бр. 2010 г. – С. 281. ил. – Библиогр.: с. 236–251.
7. Петрешин, Д.И. Возможности оснащения токарных станков с ЧПУ адаптивными системами управления / Д.И. Петрешин // Инструмент Сибири. - 2000. - № 3. - С. 26-27.
8. Петрешин, Д.И. Модуль сопряжения системы ЧПУ и ПЭВМ для построения самообучающейся технологической системы / Д.И. Петрешин // Оптимизация и управление процессом резания, мехатронные станочные системы: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа: РИО БашГУ, 2004. - С. 165 – 168.

9. Руководство по эксплуатации: техническая документация // Устройство числового программного управления NC-210. – СПб, – 2009 г. – С. 117.
10. Сосонкин В.Л. Принципы построения персональных систем ЧПУ с открытой архитектурой // Автоматизация и управление в машиностроении: электронный научный журнал. – 1997. – № 2. [Электронный ресурс]. http://magazine.stankin.ru/arch/n02/manegment/index.html (дата обращения: 05.01.2013).

ТРАНСПОРТНЫЕ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 625.7/8.002

А.Я. Башкарёв, Д.В. Мусияко, В.С. Пешков

ТЕОРИЯ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО УПЛОТНИТЕЛЯ



Альберт Яковлевич Башкарёв, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел.: +7 (812) 950-3715, E-mail: bashkarev@spbstu.ru.



Дмитрий Валентинович Мусияко, студент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел.: +7 (911) 173-023, E-mail: musiyako@gmail.com.



Вадим Сергеевич Пешков, студент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел.: +7 (981) 732-3222, E-mail: yapesha@gmail.com.

Аннотация

В работе рассматривается динамика вибрационного уплотнителя, конструкция которого объединяет плиту и валец. Аналитическим путем определено место установки вибровозбудителя и направление вращение его дебалансов, при которых достигается эффект виброперемещения уплотнителя по поверхности уплотняемого материала.

Ключевые слова: комбинированный уплотнитель, расположение вибровозбудителя, виброперемещение.

A.Y. Bashkarev, D.V. Musiyako, V.S. Peshkov

THEORY OF OSCILLATORY MOTION OF THE COMBINED PLATE COMPACTOR

Dr. Prof. Albert Y. Bashkarev[1], e-mail: bashkarev@spbstu.ru;
Dmitry M. Musiyako[1], e-mail: musiyako@gmail.com;
Vadim S. Peshkov[1], e-mail: yapesha@gmail.com.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

In this article we consider the dynamics of the vibratory compactor, whose construction combines a plate and roll. Analytically we have determined the place for installing the vibrator exciter and the direction of eccentric weight rotation, by which we achieved oscillatory motion of the plate compactor.

Key words: combined plate compactor, place for installing the vibrator exciter, oscillatory motion.

Среди многих средств уплотнения дорожных материалов особое место занимают вибрационные плиты. Главное их достоинство – малая металлоемкость и возможность уплотнить на большую глубину по сравнению, например, с дорожными катками [3]. С другой стороны, из-за относительно небольшого давления на поверхность степень уплотнения виброплитами оказывается ниже, чем у тех же катков [4]. Для устранения этого недостатка было предложено создать комбинированный вибрационный уплотнитель, конструкция которого объединяет валец и плиту [1]. Схема такого уплотнителя представлена на рис. 1:

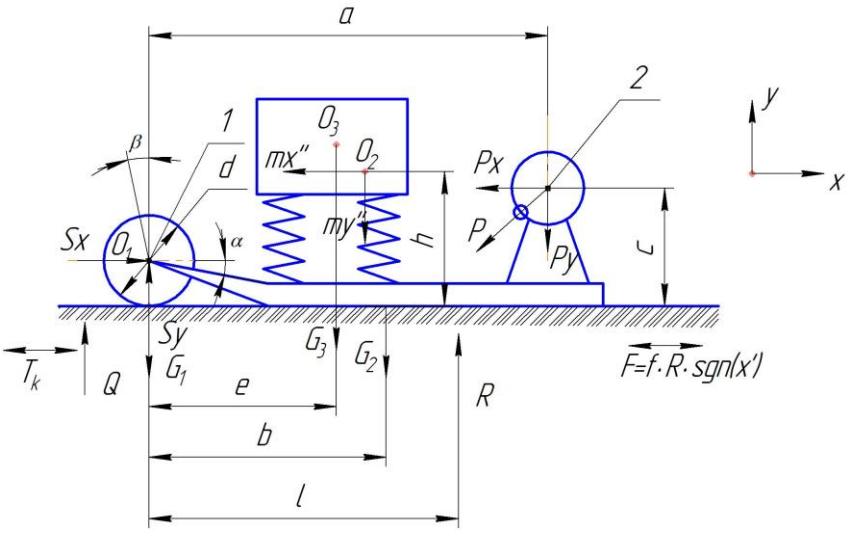


Рис. 1. Схема сил, действующих на комбинированный вибрационный уплотнитель

Здесь: G_1 – вес вальца;
G_2 – вес вибрирующей рамы с вибратором;
G_3 – вес подрессоренного двигателя;
m - масса уплотнителя;
a, b, c, d e, h, l - геометрические размеры;
F - сила трения со знаком скорости;
f - коэффициент трения скольжения;
P - возбуждающая сила вибратора;
R - реакция грунта;

O_1 – центр вальца;
O_2 – центр инерции вибрирующей рамы с вибратором;
O_3 – центр подрессоренного двигателя;
S_x и S_y – реакции в точке крепления рамы к оси вальца;
Q – реакция под вальцом со стороны опорной поверхности;
T_k – сила сопротивления качению (перекатыванию) катка;
α – угол отклонения рамы уплотнителя относительно оси вальца;
β – угол поворота вальца;
μ – коэффициент сопротивления качению.

$$F = R \cdot f \cdot \operatorname{sgn} \dot{x};$$
$$T_k = Q \cdot \mu \cdot \operatorname{sgn} \dot{x}.$$

На валец со стороны рамы действуют те же силы S_x и S_y ,но с обратным знаком.

G – общий вес уплотнителя, $G=G_1+G_2+G_3$.

В результате жёсткой горизонтальной связи $x_1=x_2=x_3=x$.

Напишем уравнения равновесия сил для вальца, соблюдая указанные на рисунке направления сил [2]:

$$\begin{cases} \dfrac{G_1}{g} \cdot \ddot{x} = S_x - Q \cdot \mu \cdot \operatorname{sgn} \dot{x}, & (1) \\ \dfrac{G_1}{g} \cdot \ddot{y}_1 = S_y + Q - G_1, & (2) \\ Y_a \cdot \ddot{\beta} = Q \cdot \mu \cdot \operatorname{sgn} \dot{x} \cdot \dfrac{d}{2}. & (3) \end{cases}$$

Здесь Y_a – момент инерции вальца относительно собственной оси.

Из рисунка видно, что:

$$\beta = \frac{2 \cdot x}{d};$$
$$\ddot{\beta} = \frac{2 \cdot \ddot{x}}{d}.$$

Выражение (3) можно записать в виде:

$$2 \cdot Y_a \cdot \frac{\ddot{x}}{d} = Q \cdot \mu \cdot \frac{d}{2} \cdot \operatorname{sgn} \dot{x}. \quad (4)$$

Уравнения равновесия сил, действующих на уплотняющую часть виброуплотнителя, соблюдая указанные на рисунке направления сил:

$$\begin{cases} \frac{G_2}{g}\cdot\ddot{x} = \mp P_x - S_x - R\cdot f\cdot \operatorname{sgn}\dot{x}\ , & (5)\\ \frac{G_2}{g}\cdot\ddot{y}_2 = -P_y + R - S_y - G_2 - G_3, & (6)\\ Y_o\cdot\ddot{\alpha} = -P_y\cdot a \pm P_x\cdot(c-\frac{d}{2}) + R\cdot l - R\cdot f\cdot\frac{d}{2}\cdot\operatorname{sgn}\dot{x} + \\ +\frac{G_2}{g}\cdot\ddot{x}\cdot(h-\frac{d}{2}) - \frac{G_2}{g}\cdot\ddot{y}_2\cdot b - G_2\cdot b - G_3\cdot e\ . & (7) \end{cases}$$

Здесь: верхние знаки указаны при вращении дебаланса по часовой стрелке, а нижние – против (данное указание справедливо на протяжении всей работы);

Yo – момент инерции уплотняющей части виброуплотнителя относительно оси вальца.

Рассмотрим режим, когда большую часть времени опорная уплотняющая часть виброуплотнителя находится в воздухе, т.е. не опирается на уплотняемую поверхность, воздействуя на неё лишь импульсом удара. Следовательно, *R=0*.

Практический интерес представляет режим работы, когда задний валец не отрывается от опорной поверхности, благодаря чему обеспечивается устойчивость уплотнителя на уклонах (обязательное условие для этого будет найдено ниже). В этом случае $y_1=const=0$, следовательно $\ddot{y}_1 = 0$. Тогда из выражения (2) следует:

$$S_y = G_1 - Q. \qquad (8)$$

Из рисунка видно, что:

$$\alpha = \frac{y_2}{b};$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{\ddot{y}_2}{b}.$$

Тогда выражение (7) с учётом *R=0* запишется в виде:

$$Y_o\cdot\frac{\ddot{y}_2}{b} = -P_y\cdot a \pm P_x\cdot\left(c-\frac{d}{2}\right) + \frac{G_2}{g}\cdot\ddot{x}\cdot\left(h-\frac{d}{2}\right) - \frac{G_2}{g}\cdot\ddot{y}_2\cdot b - G_2\cdot b - G_3\cdot e. \qquad (9)$$

После подстановки выражения (6) в выражение (9) следует:

$$\begin{aligned} &Y_o\cdot\frac{g}{b\cdot G_2}\cdot\left(-P_y - S_y - G_2 - G_3\right) = -P_y\cdot a \pm P_x\cdot\left(c-\frac{d}{2}\right) + \\ &+\frac{G_2}{g}\cdot\ddot{x}\cdot\left(h-\frac{d}{2}\right) - \left(-P_y - S_y - G_2 - G_3\right)\cdot b - G_2\cdot b - G_3\cdot e. \end{aligned} \qquad (10)$$

С учётом выражения (8), выражение (10) принимает вид:

$$Y_o \cdot \frac{g}{b \cdot G_2} \cdot \left(-P_y + Q - G_1 - G_2 - G_3\right) = -P_y \cdot a \pm P_x \cdot \left(c - \frac{d}{2}\right) + \\ + \frac{G_2}{g} \cdot \ddot{x} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right) - \left(-P_y + Q - G_1 - G_3\right) \cdot b - G_3 \cdot e. \quad (11)$$

После сложения правых и левых частей выражений (1) и (5) с учётом $R=0$, следует:

$$\ddot{x} = (\mp P_x - Q \cdot \mu \cdot \operatorname{sgn} \dot{x}) \cdot \frac{g}{G_1 + G_2}. \quad (12)$$

После подстановки выражения (12) в выражение (11) и ряда преобразований получаем:

$$Q \cdot \left[Y_o \cdot \frac{g}{b \cdot G_2} + \mu \cdot \operatorname{sgn} \dot{x} \cdot \frac{G_2}{G_1 + G_2} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right) + b \right] = Y_o \cdot \frac{g}{b \cdot G_2} \cdot \left(P_y + G_1 + G_2 + G_3\right) - \\ - P_y \cdot a \pm P_x \cdot \left[\left(c - \frac{d}{2}\right) - \frac{G_2}{G_1 + G_2} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right) \right] + \left(P_y + G_1 + G_3\right) \cdot b - G_3 \cdot e. \quad (13)$$

Можно допустить, что $Y_o = \frac{G_2}{g} \cdot b^2$, тогда:

$$Q = \frac{-P_y \cdot a \pm P_x \cdot \left[\left(c - \frac{d}{2}\right) - \frac{G_2}{G_1 + G_2} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right) \right] + 2 \cdot b \cdot \left(P_y + G_1 + \frac{G_2}{2} + G_3 \right) - G_3 \cdot e}{2 \cdot b + \mu \cdot \operatorname{sgn} \dot{x} \cdot \frac{G_2}{G_1 + G_2} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right)}. \quad (14)$$

Если выполнить конструкцию так, что $h = \frac{d}{2}$, т.е. центр тяжести вибрирующей части расположен на высоте оси вальца, то выражение (14) примет следующий вид:

$$Q = \frac{P_y \cdot (2 \cdot b - a) \pm P_x \cdot \left(c - \frac{d}{2}\right) + 2 \cdot b \cdot \left(G_1 + \frac{G_2}{2} + G_3 \right) - G_3 \cdot e}{2 \cdot b}. \quad (15)$$

При выполнении ещё одного конструкторского решения, а именно $a = 2 \cdot b$, выражение (15) после некоторых преобразований примет вид:

$$Q = \pm P_x \cdot \frac{\left(c - \frac{d}{2}\right)}{2 \cdot b} + G_1 + \frac{G_2}{2} + G_3 \cdot \left(1 - \frac{e}{2 \cdot b}\right). \quad (16)$$

Отсюда условие, при котором Q всегда больше 0, т.е. валец всегда в контакте с уплотняемой поверхностью, принимает вид:

$$\pm P_x^{\max} > \frac{G_3 \cdot (e - 2 \cdot b) - \left(G_1 + \frac{G_2}{2} \right) \cdot 2 \cdot b}{c - \frac{d}{2}};$$
$$\pm P > \frac{G_3 \cdot (e - 2 \cdot b) - \left(G_1 + \frac{G_2}{2} \right) \cdot 2 \cdot b}{c - \frac{d}{2}}. \quad (17)$$

При этом Q, а, следовательно и сила сопротивления перемещению, находится в одной фазе или в противофазе с горизонтальной составляющей возбуждающей силы вибратора, т.е. сопротивление передвижению оказывается больше или меньше, когда эта сила сдвигает уплотнитель вперёд. Таким образом, обеспечивается эффект виброперемещения назад или вперёд, что видно на рис. 2:

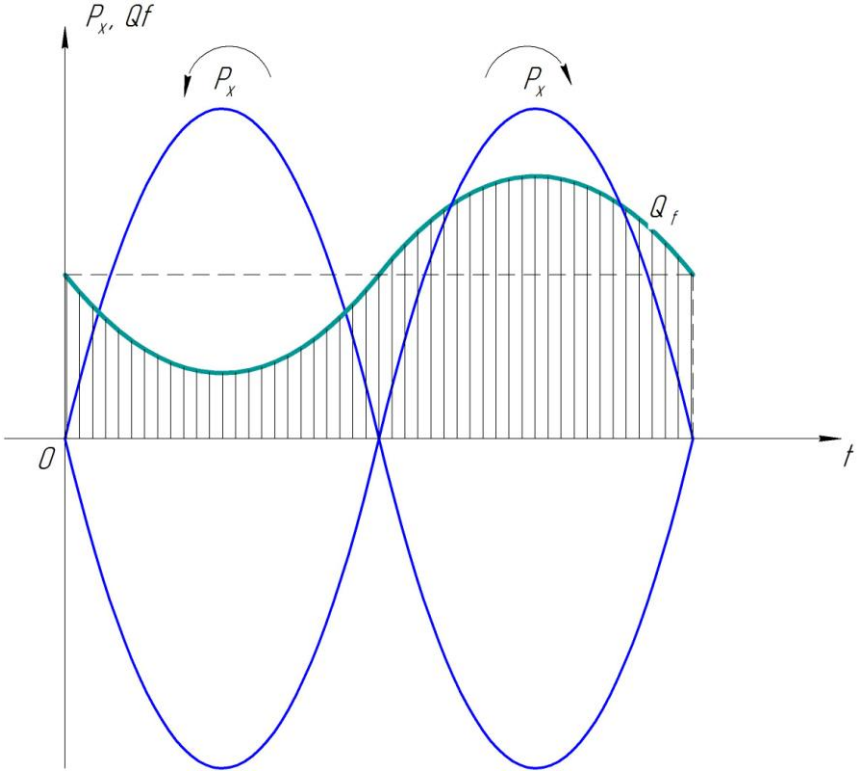


Рис. 2. График зависимости Q от Px

Таким образом, можно считать доказанным, что путем изменения направления вращения дебалансов вибратора можно создавать реверсируемые вибрационные уплотнители.

Алгоритм создания вибрационного уплотнителя представляет следующую последовательность:

1. Центр тяжести вибрирующей части уплотнителя, т.е. его плиты с вибратором, должен быть расположен на высоте оси вальца и

находиться посередине между осью вальца и осью вращения дебаланса. Это можно достигнуть изменением расположения вибратора, варьированием диаметра вальца или используя дополнительную пригрузку, устанавливаемую на плите.

2. При направлении вращения дебалансов против часовой стрелки и расположением вибратора выше центра инерции вибрационный уплотнитель будет передвигаться вперед.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Я. Башкарев, Д.В. Мусияко, В.С. Пешков. Комбинированный вибрационный уплотнитель//Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 1. – С. 175-178.
2. И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. Вибрационное перемещение. – М: Изд-во Наука, 1964. – 410 с.
3. И.Ф. Гончаревич, П.А. Сергеев. Вибрационные машины в строительстве. – М: Изд-во Машгиз, 1963. – 312 с.
4. М.П. Зубанов. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей и грунтов. – М: Изд-во Машгиз, 1959. – 219 с.

УДК 658.845

В.С. Бурлуцкий, К.П. Позынич, Е.К. Позынич

СИТУАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПАДЕНИЯ БАШЕННОГО КРАНА КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА АВАРИИ



Виктор Степанович Бурлуцкий, старший преподаватель кафедры «Транспортные и технологические машины» Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия,
Тел. +7 (812) 552-6088; e-mail: vicstep@rambler.ru



Константин Прохорович Позынич, к.т.н., доцент кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле» Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия,
Тел. +7 (4212) 56-66-47; e-mail: kpp.51@mail.ru



Евгений Константинович Позынич, старший преподаватель кафедры «Строительные и путевые машины» Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия,
Тел. +7 (4212) 56-66-47; e-mail: kpp.51@mail.ru

Аннотация

Известно, что грузоподъемные краны относятся к оборудованию повышенной опасности. Башенные краны, по сравнению с другими видами кранов, имеют при эксплуатации более высокую степень риска возникновения опасной ситуации, результатом которой может быть авария или несчастный случай. Наиболее типичными являются аварии башенных кранов, вызванные не соответствующим требованиям промышленной безопасности состоянием крановых путей и перегрузкой кранов.

В данной статье предлагается ситуационный подход при анализе условий возникновения и развития аварий башенных кранов с созданием ситуационной модели крана для каждой аварии для обнаружения причинно-следственной зависимости аварии и обстоятельств ее вызвавших, для моделирования возможного поведения крана, последствия этого поведения, а также анализа произошедших аварий.

Ключевые слова: башенный кран, авария, крановый путь, перегрузка, модель, падение, обстоятельства, причины, расследование.

V. Burlutskiy, C. Pozynich, E. Pozynich

SITUATIONAL MODEL OF THE FALL OF TOWER CRANE AZ THE TOOL OF THE ANALYSIS OF THE ACCIDENT

Victor S. Burlutskiy[1], e-mail: vicstep@rambler.ru;
Dr. Constantin P. Pozynich[2], e-mail: kpp.51@mail.ru;
Eugene C. Pozynich[3], e-mail: kpp.51@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
[2]Pacific National University, Russia,
[3]Far Eastern Transport University, Russia.

Abstract

It is known that the cranes are to equipment an elevated risk. Tower cranes, compared with other types of cranes are operating in a higher risk for the appearance of a dangerous situation, which may result in an accident or fatalities compa-special case of. Most typical tower crane accident caused by non-compliant industrial safety status of crane tracks and crane overload.

This article offers a situational approach in the analysis of conditions of occurrence and development of accidents of tower cranes with the making of situational model of a crane for each accident, to discover the causal effect dependence of circumstances, to modeler the possible behavior of the crane, the aftereffect of this behavior, to analyze the experience the occurred accidents.

Key words: tower crane, accident, crane way, overload, the model, the fall, the circumstances, causes, investigation.

В современном строительстве используются различное технологическое оборудование и механизмы. Практически во всех случаях осуществление строительной деятельности не обходится без грузоподъемных механизмов, в том числе различных типов кранов. Известно, что грузоподъемные краны относятся к оборудованию повышенной опасности. Башенные краны, по сравнению с другими видами кранов, имеют при эксплуатации более высокую степень риска возникновения опасной ситуации, результатом которой может быть авария или несчастный случай. Причиной этого служат особенности конструкции крана и его пути, частая смена мест эксплуатации, связанная с монтажом и демонтажом, а также особенности организации строительных площадок.

Особенности конструкции башенных крана заключаются в следующем. При большой высоте они имеет незначительные колею (расстояние между рельсами кранового пути, как правило, не превышает 6 метров) и базу (расстояние между осями ходовых тележек, расположенных на одном рельсе, также не превышает 6 метров). Эксплуатация башенных кранов на

строительных площадках связана с повышенным риском возникновения опасной ситуации. Поэтому их применение возможно лишь при наличии проекта производства работ кранами (ППРк), который учитывает зону работы башенного крана. При выполнении строительных работ в жилых районах особое внимание должно обращаться на зоны возможного падения крана в случае аварии. Определение границ этой зоны должно выполняться с учетом характеристик уже имевших место аварий.

Анализ статистических данных аварий и несчастных случаев со смертельным исходом, происшедших при эксплуатации грузоподъемных кранов, позволяет сделать вывод о том, что при эксплуатации башенных наблюдается достаточно высокий уровень аварийности (около 40 % от общего количества аварий) и травматизма (около 30 % от общего числа смертельных случаев на кранах) [1], причём технические неисправности кранов не являлись основными причинами происшедших несчастных случаев и аварий. Как показал анализ обстоятельств произошедших аварий с передвижными рельсовыми башенными кранами, основными причинами аварий и несчастных случаев при их эксплуатации являются организационные, такие как:

- низкая производственная и технологическая дисциплина на объектах строительства;
- невыполнение руководителями и специалистами должностных обязанностей по обеспечению безопасных условий труда для подчиненных и по организации безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов;
- эксплуатация крана на пути, не соответствующем требованиям промышленной безопасности (например, путь частично не обустроен, элементы пути не соответствуют типу крана и т.д.);
- нарушение требований производственных инструкций;
- неэффективность системы производственного контроля и пр.

Проведённые нами исследования позволили сделать вывод о том, что наиболее типичными являются аварии передвижных рельсовых башенных кранов, вызванные не соответствующим требованиям промышленной безопасности состоянием крановых путей и перегрузкой кранов. Анализ обстоятельств произошедших аварий показал, что имеются определённые закономерности в поведении кранов при падении, а также в положении и состоянии их составных частей после падения.

Из анализа статистических данных аварий на башенных кранах следует, что при не соответствующим требованиям промышленной безопасности состоянии крановых путей наиболее значимы случаи, связанные с аварийным наездом кранов на тупиковые упоры. При этом характерен наезд на незакрепленные, неисправные или не соответствующие типоразмеру крана тупиковые упоры, в результате чего кран их сбивает, сходит с рельсов и падает.

На рис. 1 представлены примеры типичных положений передвижных рельсовых башенных кранов с подъёмной стрелой после аварии в результате не соответствующего требованиям промышленной безопасности состояния крановых рельсовых путей (рис. 1, а) и перегрузки крана (рис. 1,б).



а)



б)

Рис. 1. Аварии башенных кранов в результате: *а* – ненормативного состояния крановых рельсовых путей; *б* – перегрузки башенного крана

Кратко опишем основные признаки типичного положения и состояния элементов рассматриваемых кранов для обоих случаев.

При наезде на незакрепленные, неисправные или не соответствующие типоразмеру крана тупиковые опоры:

- кран полностью сходит с рельсов кранового пути, опрокидывается (падает) по ходу движения, при этом ходовая рама и соединенная с ней опорно-поворотным кругом рама поворотной платформы занимают практически вертикальное положение;
- часть башни, включая портал, оставаясь соединенной с поворотной платформой, находится задней гранью к земле (вниз) в положении, близком к горизонтальному (при падении на землю) или находится на строящемся здании; при этом положение «задней гранью к земле» наиболее типичное, независимо от того, куда была направлена стрела до момента наезда крана на тупиковые упоры;
- башня крана получает сложную общую деформацию (отклонение продольной оси от прямолинейности с изгибом, а также множественные деформации элементов решёток граней, в результате чего башня теряет в месте общей деформации проектные форму и размеры; часть башни со стороны портала и элементы портала в большинстве случаев видимых повреждений не имеют;
- противовес, состоящий из отдельных плит, находится в нижнем горизонтальном или близком к горизонтальному положении под башней, опираясь на землю и в стену строящегося здания;

– стрела крана, находящегося в момент падения без груза на крюке или с малым грузом, при падении совершает вращательное движение в плоскости падения башни, и в последней фазе падения падает на землю плашмя или, деформировавшись в момент падения, входит головкой в землю;
– общее направление продольной оси башни лежащего крана – вдоль продольной оси пути или под небольшим углом к ней.

При перегрузке крана:

– падение башенного крана происходит в сторону направления стрелы;
– очень часто кран лежит «на боку» под углом к крановому пути, близким к прямому углу:
– ходовая рама находится на рельсах кранового пути;
– поворотная часть крана, как правило, оторвана от ходовой рамы;
– башня или портал имеют характерное место излома с разрушением в этом месте элементов решёток или поясов.

При расследовании аварии решается проблема определения ее причины. Довольно часто приходится делать интуитивные выводы вследствие недостатка информации для всестороннего рассмотрения и отсутствия технологий для быстрой оценки вариантов.

В связи со сказанным исследование проблемы безопасности эксплуатации башенных кранов на рельсовом ходу с позиции моделирования процесса аварийной ситуации представляется весьма актуальным. Известны работы, например [2], где эта проблема рассматривается с использованием методов теории вероятности, математической статистики, логистики, научных обобщений в области информации об авариях и несчастных случаях, методов многопараметрического анализа динамических процессов, теории рисков и катастроф, технической диагностики, строительной механики, моделирования, вычислительной математики.

В настоящей работе рассматривается возможность применения ситуационного подхода к анализу аварий башенных кранов, который позволяет исследовать взаимодействие различных ситуационных переменных для того, чтобы обнаружить причинно-следственную зависимость обстоятельств, смоделировать и предсказать возможное поведение крана, последствия этого поведения, а также проанализировать обстоятельства произошедших аварий. Для возможности оперативной аналитической обработки большого количества взаимосвязанной информации при расследовании аварии предлагается применять принципы так называемой системы ситуационного отображения информации (ССОИ), широко используемой в различных отраслях. Основная задача ССОИ – построение изображений ситуаций, возникающих в предметной области, на основе которых специалисты, занимающиеся расследованием аварии, принимают управляющие решения в рамках определенной задачи, анализа обстоятельств аварии. Принятие управляющих решений в рассматриваемом процессе моделирования прин-

ципиально отличает данный подход от подхода с имитацией аварийных ситуаций (катастроф) с использованием неуправляемых фаз движения [3].

Принятие решений основывается на ситуационном моделировании. Процесс моделирования разделяется на две составные части: проектирование модели крана и ее симулирование, т.е. моделирование аварийной ситуации.

Результатом проектирования является модель, представленная на соответствующем языке описания, основным элементом которой является понятие ситуации, причем понятие ситуации отождествляется с понятием состояния. В моделировании под состоянием понимается значение определённых характеристик в заданный момент времени.

Кратко рассмотрим суть предлагаемого подхода.

На рис. 2 показано положение передвижного рельсового башенного крана КБ-405.1А после наезда на незакреплённые тупиковые упоры и последовавшего за этим падением.



Рис. 2. Положение крана после аварии, вызванной не соответствующим требованиям промышленной безопасностисостоянием кранового рельсового пути (наезд крана на незакреплённые тупиковые упоры)

Изучение положения и внешнего вида крана и его отдельных элементов после падения, знакомство с показаниями очевидцев, анализ эксплуатационной документации и материалов аналогичных аварий дали возможность составить модель крана, представляющую собой так называемую *сборку*, состоящую из отдельных компонентов (стрела, башня, ходовая рама и т.д.). Это, в свою очередь, позволило показать поведение крана при

аварии и объяснить положение крана и его отдельных элементов после аварии, т.е. создать ситуационную модель сценария развития аварии. В связи с ограниченностью объёма публикации ниже приведены только основные этапы симулирования модели крана по сценарию развития аварии (рис. 3-8).

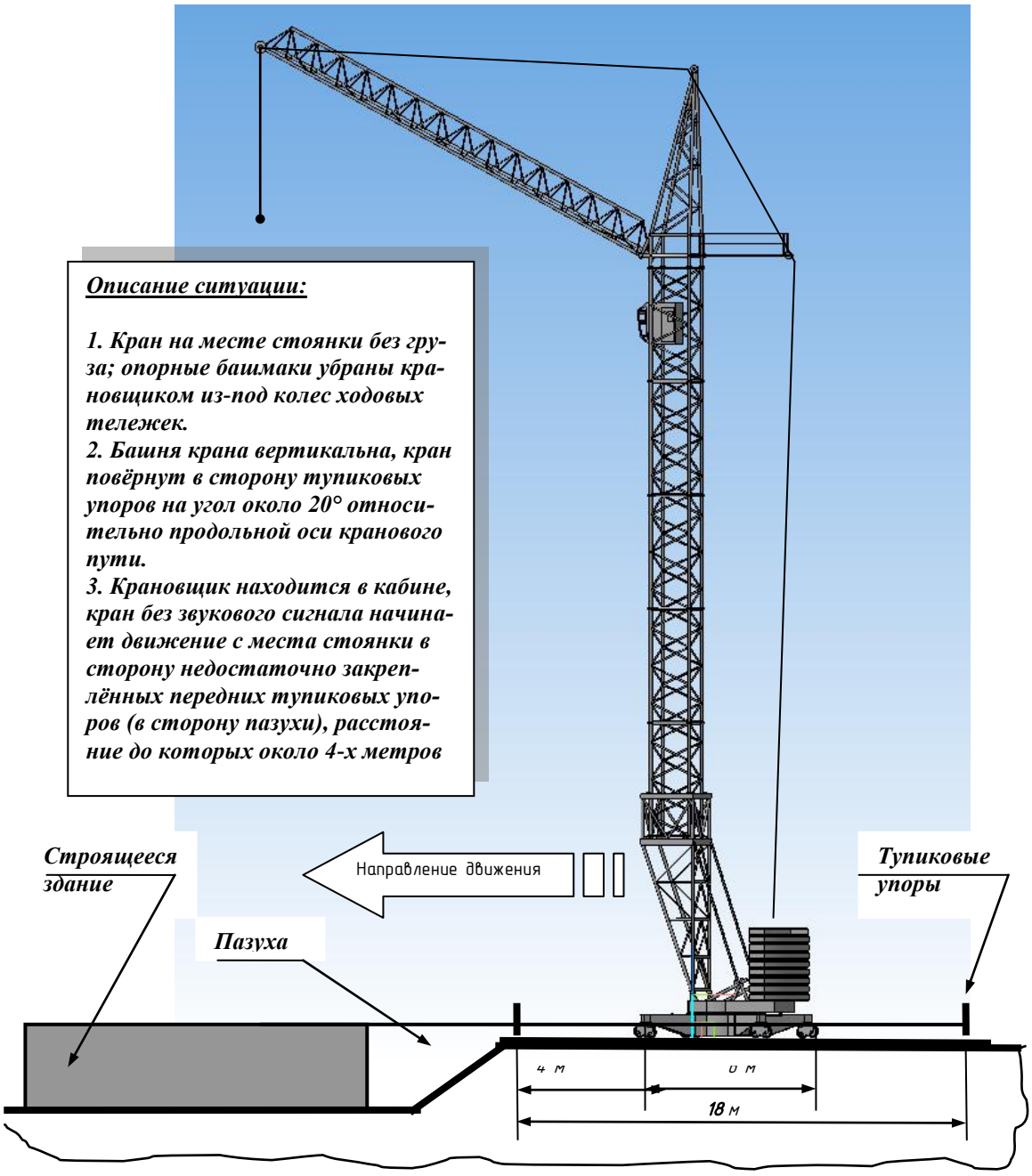
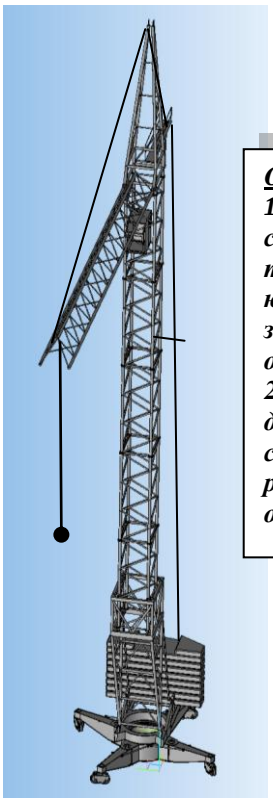


Рис. 3. Исходное положение крана перед началом движения (перед аварией)

Описание ситуации, предшествовавшей аварии, показано на рис. 3. Описания дальнейших ситуаций приведены на рисунках.



Описание ситуации:
1. Колеса передних ходовых тележек съезжают с рельсов на железобетонные подрельсовые балки и остаются на них, т.к. балки выступают за тупиковые упоры на расстояние около 1300 мм.
2. Башня наклоняется вперёд по ходу движения на угол 15…17°, при этом стрела остаётся повернутой в сторону движения под углом около 20° к оси кранового пути.

Рис. 4. Положение крана после сноса тупиковых упоров



Описание ситуации:

1. Противовес массой около 50 т и поворотная платформа массой 12 т наклоняются в пространстве, их центр тяжести смещается относительно оси вращения крана, возникает составляющая веса противовеса и платформы, стремящаяся повернуть их и всю поворотную часть крана по часовой стрелке относительно неподвижной ходовой части.
2. В таком неустойчивом равновесии кран находится некоторое время, в течение которого крановщик покидает кабину и начинает спускаться вниз

Рис. 5. Исходное положение крана перед началом вращения вокруг наклонной башни



Рис. 6. Промежуточное положение крана при повороте вокруг наклонной оси (а) и окончательное положение (б) при завершении вращения крана вокруг наклонной оси перед началом падения

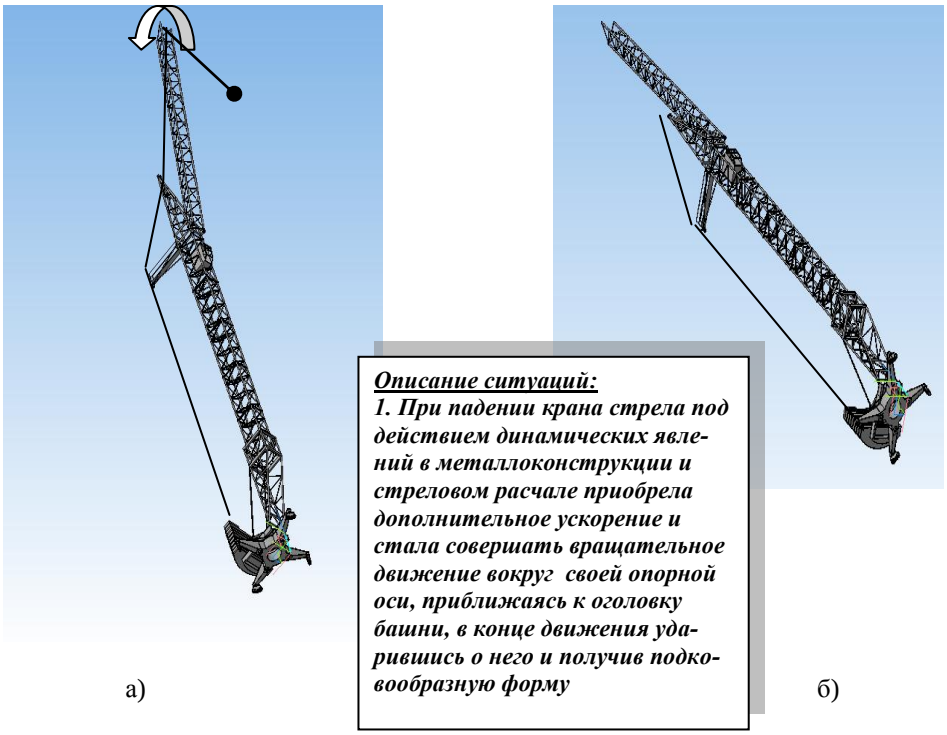


Рис. 7. Промежуточное положение стрелы (а) и положение стрелы в момент удара об оголовок башни (б) при падении крана

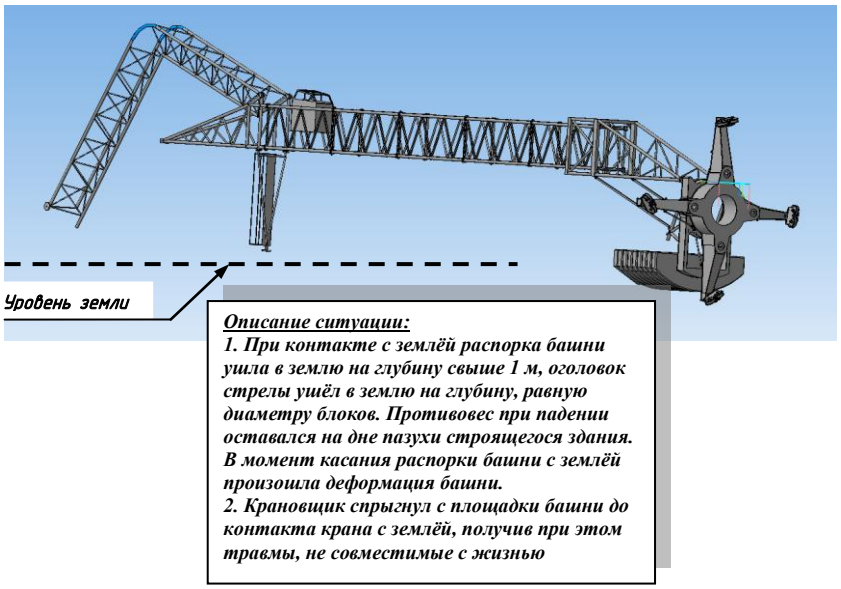


Рис. 8. Завершающая стадия падения крана

При аварии зона падения крана превысила не только зону работы башенного крана, но и пределы огороженной территории стройплощадки. Так, оголовок башни, стрела и крюковая подвеска с канатами оказались на территории прилегающего к стройплощадке школьного двора.

Таким образом, в данном случае подтверждается утверждение о том, что размеры опасной зоны работы башенного крана должны быть ограничены не только зоной возможного выполнения грузоподъемных операций, но и размерами зоны возможного падения крана в случае аварии. Ситуационное моделирование условий возникновения и развития аварий башенных кранов может служить инструментом при определении таких зон при разработке ППРк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ООО «ПСК «АСПЭК»: особенности эксплуатации башенных кранов в стесненных условиях [Электронный ресурс] // Журнал «Промышленная и экологическая безопасность» (г. Ижевск, Удмуртская Республика). – 2006. – № 2 (2) декабрь. URL: http://www.udmnews.ru/zhurnal/arkhiv/nomer_zhurnala/detail.htm?itemid=515657. (дата обращения: 20.02.2013).
2. Жуков В.Г. Повышение безопасности эксплуатации башенных кранов на рельсовом ходу: Дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 : Новочеркасск, 2004. – 174 с.
3. Ястребов Ф.В. Реализация пространственных движений при имитации катастроф на театральной сцене // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы Международной научно-практической конференции / Под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 842-844.

УДК 621.873.001.24

В.С. Бурлуцкий, К.П. Позынич, Е.К. Позынич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ЛИНЕЙНОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРАКТИЧЕСКОМ РАСЧЁТЕ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ КРАНОВЫХ СТРЕЛ



Виктор Степанович Бурлуцкий, старший преподаватель кафедры «Транспортные и технологические машины» Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия,
Тел. +7 (812) 552-6088; e-mail: vicstep@rambler.ru



Константин Прохорович Позынич, к.т.н., доцент кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле» Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия,
Тел. +7 (4212) 56-66-47; e-mail: kpp.51@mail.ru



Евгений Константинович Позынич, старший преподаватель кафедры «Строительные и путевые машины» Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия,
Тел. +7 (4212) 56-66-47; e-mail: kpp.51@mail.ru

Аннотация

Выполняемые по недеформированным схемам расчёты на прочность позволяют предварительно выбрать сечения секций телескопических крановых стрел. Однако эти расчёты не учитывают упругих деформаций стрелы, которые в реальных гибких телескопических стрелах, особенно изготовленных из высокопрочных сталей, весьма значительны (по опубликованным данным прогиб вершин стрел в плоскости качания в ряде случаев достигает 0,04…0,05 длины стрелы). В работе приведена практическая методика деформационного расчёта телескопических крановых стрел.

Ключевые слова: телескопические крановые стрелы, изгибающий момент, прогиб, сжимающая сила, деформационный момент.

V. Burlutskiy, C. Pozynich, E. Pozynich

DEFINITION ELASTIC DEFLECTION FROM LINEAR DEFORMATION AT PRACTICAL CALCULATINS TELESCOPIC CRANE ARROW

Victor S. Burlutskiy[1], e-mail: vicstep@rambler.ru;
Dr. Constantin P. Pozynich[2], e-mail: kpp.51@mail.ru;
Eugene C. Pozynich[3], e-mail: kpp.51@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
[2]Pacific National University, Russia,
[3]Far Eastern Transport University, Russia.

Abstract

Performed on undeformed schemes strength calculations can pre-select the section telescopic crane booms. However, these calculations do not take into account the elastic deformation boom, which in real flexible telescope, especially made of high-strength steels are significant (the published data of the deflection peaks of arrows in the swing plane, in some cases up to 0,04...0,05 arm length). This article offers contains practical methodology of calculation of the deformation of telescopic crane booms.

Key words: telescopic crane boom, the bending moment, bending, compressive strength, the deformation moment.

Для телескопических крановых стрел характерно отсутствие линейной пропорциональности между действующей нагрузкой и деформациями. Причиной возникновения нелинейных деформаций является продольно-поперечный изгиб, испытываемый имеющей значительную гибкость стрелой. Увеличенные вследствие отклонения от линейности деформации и вызванные ими деформационные добавки изгибающего момента от действия сжимающей силы, для которой прогиб стрелы является эксцентриситетом, существенно повышают суммарные напряжения в элементах стрелы [1, 2].

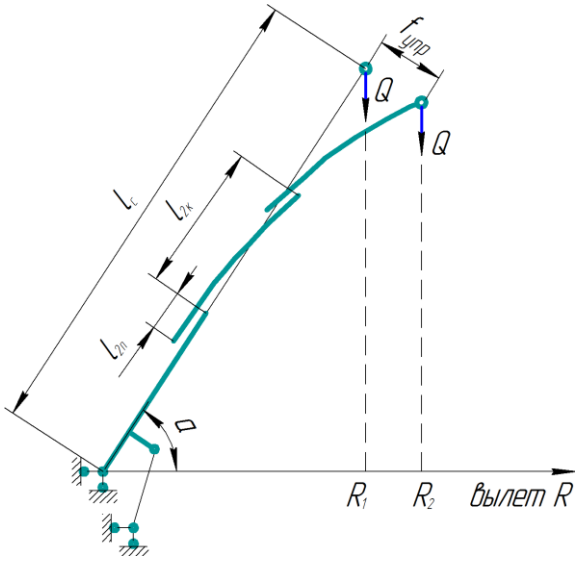
Для примера на рис. 1, а представлены внешний вид и схема упругих перемещений элементов деформированной телескопической стрелы в плоскости её качания.

В данной работе рассматривается действие двух основных силовых факторов в плоскости качания – изгибающего момента M_z от статических нагрузок и деформационной добавки $M_z^{Д}$ изгибающего момента в этой же плоскости от действия сжимающей силы, для которой прогиб стрелы является эксцентриситетом.

Деформации стрелы определяются без учета влияния перерезывающей силы, что вполне оправдано, поскольку учет влияния перерезывающей силы приводит, как известно, к весьма незначительному увеличению прогиба. Углы поворота поперечных сечений стрелы считаются пренебрежимо малыми, в результате чего упругие прогибы стрелы определяются исходя из общеизвестных положений сопротивления материалов.

В плоскости качания стрела представляет собой двухопорную балку с развитой консольной частью (рис. 2). Опорами первой (корневой) секции является коренной шарнир на раме базовой машины и шток гидроцилиндра. На конце консольной части первой секции длиной l_{1K} шарнирно закреплена вторая секция длиной l_{2K} и т.д. (рис. 4, а).





а) б)

Рис. 1. Внешний вид и схема упругих перемещений элементов деформированной телескопической стрелы

При заданных геометрических параметрах стрелы нормальные изгибные напряжения зависят от внешних нагрузок и деформаций, вызванных этими нагрузками. Приняты следующие обозначения: $\boldsymbol{P_Q}^z$ – изгибающее усилие от веса поднимаемого груза, N_Q – сжимающее стрелу усилие, M_k – конструктивный изгибающий момент, вызванный очертанием оголовка стрелы, $q_{1z} \ldots q_{4z}$ – погонные нагрузки от веса секций (включая элементы телескопирования внутри секций), $J_{1z} \ldots J_{4z}$ – моменты инерции поперечных сечений секций, $G^z_{o1} \ldots G^z_{o3}$ – вес опорных узлов (скользуны, ролики, воротники) в вершинах охватывающих секций, $G^z_{p2} \ldots G^z_{p4}$ – вес опорных узлов в корнях охватываемых секций, $l^z_{1k} \ldots l^z_{4k}$ – длины консольных частей секций, $l_{1n} \ldots l_{4n}$ – длины пролётных частей секций.

Момент в опасном сечении от изгибающего усилия

$$M^{z}{}_{Q} = P_Q \quad (l_c \quad l_{1n}) \,.$$

Момент в опасном сечении от веса секций и элементов телескопирования внутри секций

$$\boldsymbol{M}^{z}_{q} = \boldsymbol{M}_{qc} + \boldsymbol{M}_{cm} + \boldsymbol{M}_{г/ц},$$

где M_{qc} – момент от веса секций;

$M_{ст}$ – момент от веса перекрытых частей секций;

$M_{г/ц}$– момент от веса элементов телескопирования внутри секций.

Вес опорных узлов секций создает в опасном сечении изгибающие моменты $\mathbf{M}^z_o$ и $\mathbf{M}^z_P$. Общий изгибающий момент в опасном сечении по недеформированной схеме (рис. 2) равен

$$\mathbf{M}_z = \mathbf{M}^z_Q + \mathbf{M}^z_q + \mathbf{M}^z_o + \mathbf{M}^z_P + M_K.$$

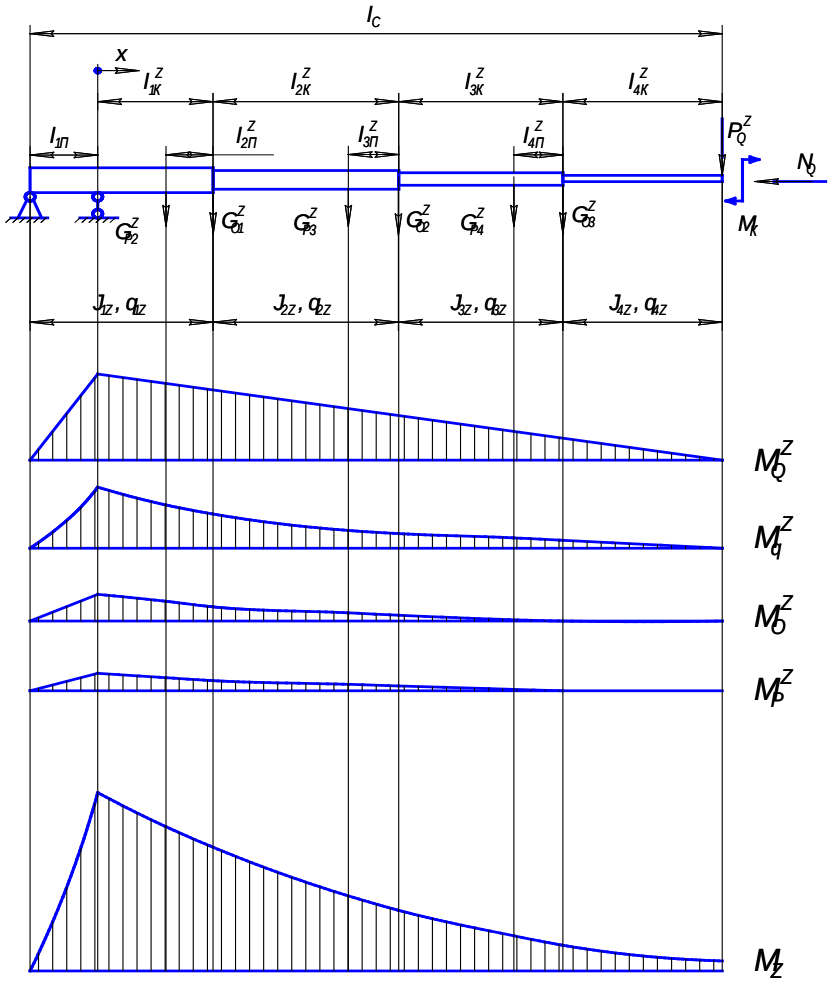


Рис. 2. Расчетная схема стрелы в плоскости качания и нагрузки недеформированного состояния

Первоначальная эпюра изгибающих моментов M^H_Z, действующих на стрелу в плоскости качания, показана на рис. 3, а. Расчетное значение этих моментов для первой (корневой), второй, третьей и четвертой секций обозначены соответственно M^H_{Z1}, M^H_{Z2}, M^H_{Z3}, M^H_{Z4}. Стрела воспринимает также действие продольной сжимающей силы N.

Под действием моментов M^H_Z консольная часть стрелы прогнется (рис. 3, б), вершины секций стрелы получат прогибы соответственно $f_{Z1}, f_{Z2}, f_{Z3}, f_{Z4}$. В результате возникнет деформационный изгибающий

момент от силы N, плечом которой является прогиб стрелы. Эпюра деформационного момента показана на рис. 3, в, где значения

$$M_{Z1}^{Д} = N \cdot f_{Z4};$$

$$M_{Z2}^{Д} = N \cdot (f_{Z4} - f_{Z1});$$

$$M_{Z3}^{Д} = N \cdot (f_{Z4} - f_{Z2});$$

$$M_{Z4}^{Д} = N \cdot (f_{Z4} - f_{Z3});$$

$$M_{Z5}^{Д} = 0.$$

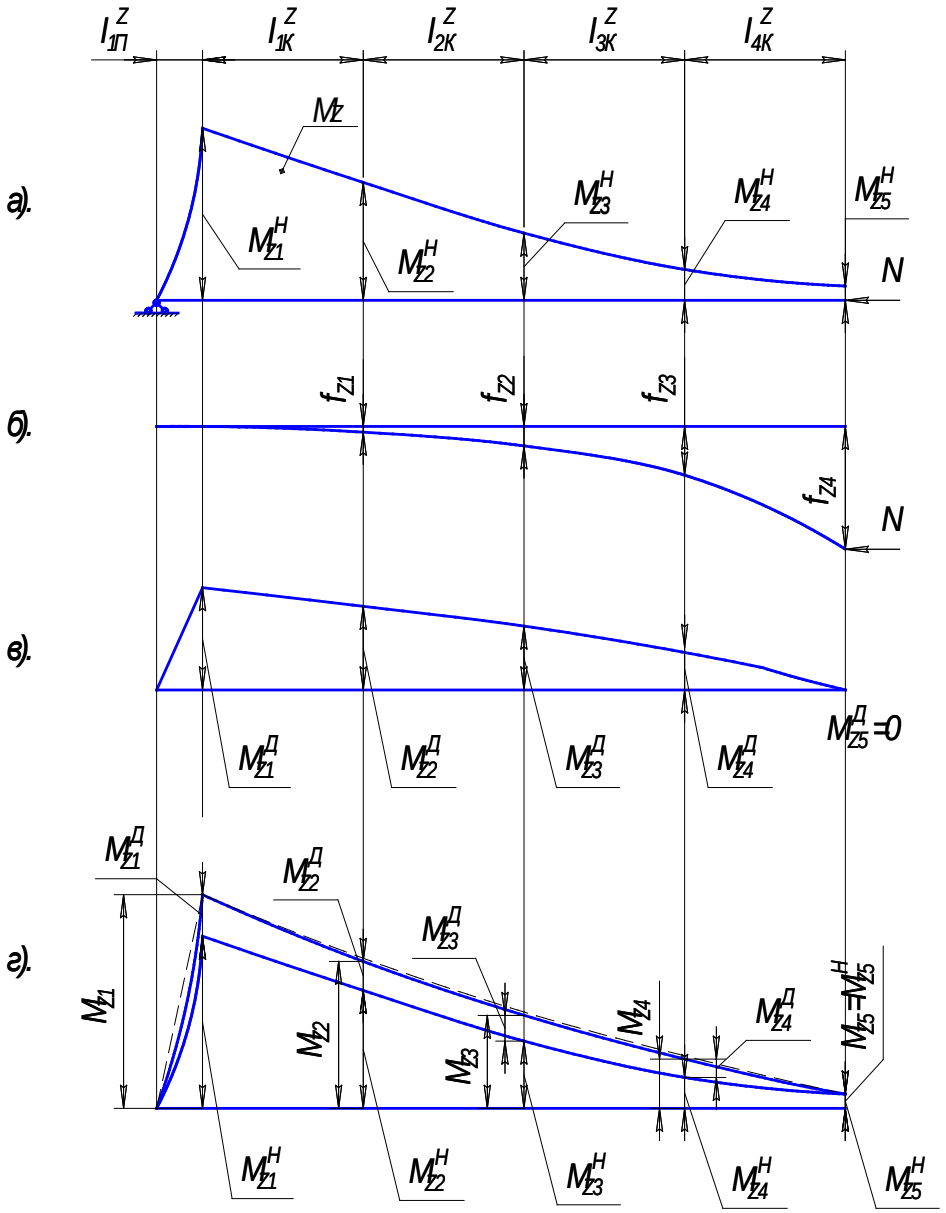


Рис. 3. Схема нагружения стрелы в недеформированном состоянии (а), прогиб стрелы (б), эпюры деформационного (в) и суммарного (г) изгибающих моментов

После деформации стрела будет нагружена эпюрой изгибающих суммарных моментов (рис. 3, г), состоящих из первоначальных изгибающих моментов и деформационных добавок:

$$M_{Z1} = M_{Z1}^{H} + M_{Z1}^{Д};$$

$$M_{Z2} = M_{Z2}^{H} + M_{Z2}^{Д};$$

$$M_{Z3} = M_{Z3}^{H} + M_{Z3}^{Д};$$

$$M_{Z4} = M_{Z4}^{H} + M_{Z4}^{Д};$$

$$M_{Z5} = M_{Z5}^{Д}.$$

Действие на стрелу суммарного момента M_Z (рис. 3, г), который численно больше первоначального M_Z^H (рис. 3, а), приведет к увеличению прогиба, что в свою очередь приведет к дальнейшему росту деформационного момента и т.д. Вычисления повторяются до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность расчета.

Эпюра суммарного момента (рис. 3, г) на участке стрелы, равной длине одной секции, незначительно отличается от прямолинейности. В целях существенного упрощения расчета без ущерба для точности получаемых результатов кривая M_Z, описывающая очертания эпюры на рис. 3, г, может быть заменена ломаной линией с линейным законом изменения изгибающего момента в пределах одной секции (пунктирные линии на рис. 3, г). При этом значение момента M_Z на границах секций являются точными, а вышеприведенный подход дает решение «в запас».

При расчете прогибов в плоскости качания телескопическую стрелу крана можно представить как последовательность соединенных консольных статически определимых двухопорных секций (балок). Опорами первой секции является коренной шарнир на раме базовой машины и шток гидроцилиндра. На конце консольной части первой секции длиной l_{1K} шарнирно закреплена вторая секция длиной l_{2K} и т.д. (рис. 4, а).

Выше было сказано, что эпюра расчетных значений изгибающих моментов, действующих на стрелу, может быть приведена к виду, показанному на рис. 4, б. В этом случае каждая отдельно взятая секция стрелы нагружена так, как это показано на рис. 4, в.

И условия опирания, и условия нагружения секций аналогичны, поэтому расчетной схемой нагружения любой секции стрелы будет схема, приведенная на рис. 5.

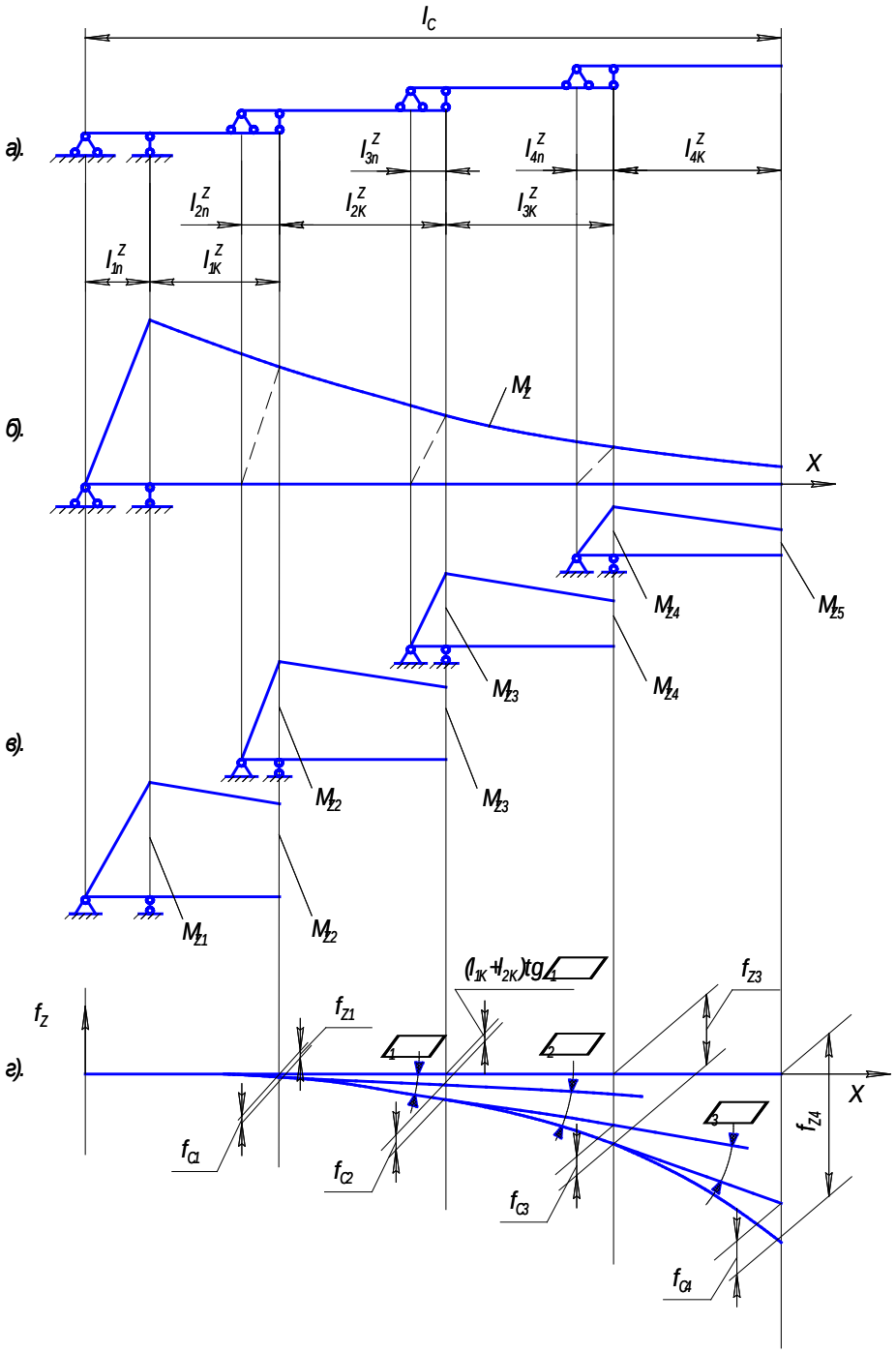


Рис. 4. Расчетная схема стрелы при расчете деформаций в плоскости качания (а), эпюры изгибающих моментов, действующих на стрелу (б), отдельные секции (в) и схема к расчету прогибов стрелы (г)

На первом участке при $0 \le x \le Z_i$ уравнение упругой линии для секции

$$-EJf_1'' = M_i \frac{x}{Z_i};$$

на втором участке $(Z_i \le x \le Z_i + l_i)$

$$-EJf_2'' = M_i - (M_i - M_{i+1})\frac{x - Z_i}{l_i}.$$

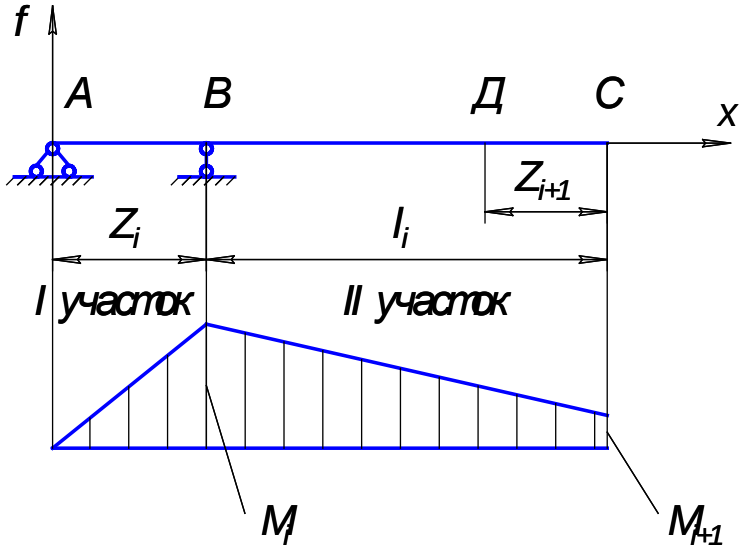


Рис. 5. К расчету прогибов отдельных секций стрелы

Здесь E – модуль нормальной упругости материала балки;

J – момент инерции поперечного сечения балки;

i – номер секции $(1 \le i \le 4)$;

M_i, M_{i+1} – изгибающие моменты соответственно в опасном сечении и в вершине секции (рис. 4, в);

x, Z_i, l_i – см. рис. 5;

f_1, f_2 – текущее значение прогибов на первом и втором участках.

Проинтегрируем дважды полученные выражения. Сначала получим

$$-EJf_1' = M_i \frac{x^2}{2Z_i} + C_1;$$

$$-EJf_2' = M_i x - (M_i - M_{i+1})\frac{\frac{x^2}{2} - xZ_i}{l_i} + C_2;$$

затем

$$-EJf_1 = M_i \frac{x^3}{6Z_i} + C_1 x + C_3; \qquad (1)$$

$$-EJf_2 = M_i \frac{x^2}{2}. \qquad (2)$$

Из уравнения (1) при $x = 0$ и $f_1 = 0$ находим, что $C_3 = 0$, а при $x = Z_i$ прогиб также равен нулю, поэтому

$$C_1 = -M_i \frac{Z_i}{6}.$$

В точке В над опорой (рис.5) углы поворота левой и правой частей балок равны, т.е. $f_1^{'} = f_2^{'}$ или

$$M_i \frac{Z_i^2}{2Z_i} - M_i \frac{Z_i}{6} = M_i Z_i - (M_i - M_{i+1}) \frac{\frac{Z_i^2}{2} - Z_i^2}{l_i} + C_2.$$

Отсюда находим

$$C_2 = -\frac{2}{3} M_i Z_i - \left(M_i - M_{i+1}\right) \frac{Z_i^2}{2l_i}.$$

Еще один неизвестный коэффициент можно найти из условия, что при $x = Z_i$ прогиб $f_2 = 0$. Используя уравнение (2), получим

$$0 = M_i \frac{Z_i^2}{2} - (M_i - M_{i+1}) \frac{\frac{Z_i^3}{6} - \frac{Z_i^3}{2}}{l_i} - \frac{2}{3} M_i Z_i^2 - \left(M_i - M_{i+1}\right) \frac{Z_i^3}{2l_i} + C_4.$$

Отсюда

$$C_4 = M_i \frac{Z_i^2}{6} - \left(M_i - M_{i+1}\right) \frac{Z_i^2}{2l_i}.$$

Подставив найденные значения постоянных интегрирования C_3 и C_4 в уравнение (2), получим выражение для определения прогиба любой точки консольной части балки (участок II на рис. 5):

$$f_2 = \frac{M_i Z_i^3}{6EJl_i} \left[4\frac{l_i x}{Z_i^2} - 3\frac{l_i x^2}{Z_i^3} - \frac{l_i}{Z_i} + \frac{M_i - M_{i+1}}{M_i} \left(\frac{x - Z_i}{Z_i} \right)^3 \right]. \qquad (3)$$

Далее порядок определения прогибов вершин каждой из четырех секций стрелы строится следующим образом. Сначала определяется прогиб точек С и Д (рис. 5), где расположены скользуны или опорные ролики, отдельно для каждой секции, показанной на рис. 4, в. Вычисляются тангенсы углов поворота прямых, соединяющих точки С и Д (рис. 4, г):

$$tg\beta_i = \frac{f_{Ci} - f_{Дi}}{Z_{i+1}},$$

где f_{Ci}, $f_{Дi}$ - прогибы точек С и Д, определенные по формуле (3).

Затем находятся прогибы вершин отдельных секций, находящихся в составе стрелы.

Прогиб вершины первой корневой секции – это прогиб консольной балки. Поэтому

$$f_{Z1} = f_{C1}.$$

Прогиб вершины второй секции будет равным прогибу вершины первой секции плюс прогиб второй секции как консольной балки, нагруженной по схеме на рис. 3, в, и плюс прогиб, обусловленный поворотом опор второй секции на угол θ_1. Этот поворот вызван тем, что первая секция прогнулась и точки контакта второй секции с первой секцией (точки С и Д) получили различные прогибы. Таким образом (рис. 4, г)

$$f_{Z2} = f_{Z1} + f_{C2} + l_{2K} tg\beta_1.$$

Рассуждая аналогичным образом, получим:

$$f_{Z3} = f_{Z2} + f_{C3} + l_{3K}(tg\beta_1 + tg\beta_2);$$
$$f_{Z4} = f_{Z3} + f_{C4} + l_{4K}(tg\beta_1 + tg\beta_2 + tg\beta_3).$$

Таким способом можно определить отклонение от прямой линии любой точки стрелы. Так, например, отклонение оси стрелы от прямой линии в вершине равно прогибу $f_{z4.}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. – Л.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
2. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин: Учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2005. – 423 с.

УДК 625.655.3

Н.А. Кондрашов А.А. Шестопалов

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ МАШИН И ТЕХНОЛОГИИ УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЯХ



Никита Александрович Кондрашов, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический Университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812) 552-67-26, E-mail: nikita.kondrashov@gmx.de



Александр Андреевич Шестопалов, д. т. н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812) 552-67-26, E-mail: shestop-37@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены условия работы и рекомендации по выбору рациональных параметров машин, предназначенных для уплотнения дорожных покрытий, устраиваемых из горячих асфальтобетонных смесей. Отмечены недостатки существующей технологии уплотнения таких материалов и пути возможного их устранения.

Ключевые слова: дорожные катки, асфальтобетонные покрытия, технология уплотнения

N.A. Kondrashov, A.A. Shestopalov

RECOMMENDATIONS FOR MACHINE PARAMETERS OPTIMIZATION AND COMPACTION TECHNOLOGY OF ASPHALT MIXES FOR PAVEMENT

Nikita A. Kondrashov[1], e-mail: nikita.kondrashov@gmx.de
Dr. Alexander A. Shestopalov[1], e-mail: shestop-37@yandex.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

In this article the working conditions of the hot mix asphalt compaction machines have been examined and recommendations of setting their rational parameters have been given. The disadvantages of the current compaction

technology of these materials have been considered and the improvement suggestions have been made.

Key words: road roller, asphalt pavement, compaction technology

В связи с постоянным увеличением интенсивности движения автомобилей и как следствие нагрузок, оказываемых на дорожное покрытие, к эксплуатационным свойствам последнего предъявляются постоянно растущие требования. Для обеспечения необходимых значений прочности, сдвигоустойчивости, стойкости к выкрашиванию, ровности и водостойкости покрытия обязательным условием является достижение требуемого качества уплотнения. Данные вопросы уже неоднократно рассматривались в работах ведущих ученых в области дорожного строительства [1] – [4].

Требуемая плотность дорожного покрытия может быть достигнута только при правильном назначении параметров и соблюдении всех режимов технологии уплотнения асфальтобетонной смеси. В ее основе лежит принцип, используемый в механике грунтов и утверждающий, что деформирование и уплотнение эффективнее происходит при многократном приложении нагрузок с поочередными циклами нагружения и разгрузки.

При этом эффективность уплотнения определяется закономерностью развития и накопления необратимых деформаций - $\varepsilon_{необр}$. Последние определяются главным образом величиной максимальных контактных давлений под рабочим органом уплотняющей машины - $\varepsilon_{необр} = \int(\sigma_{мах})$.

Для оптимального ведения процесса уплотнения необходимо соблюдать условие $\sigma_{мах} \leq \sigma_р$, где $\sigma_{мах}$ – максимальные контактные давления под рабочим органом уплотняющей машины, а $\sigma_р$ – предел прочности уплотняемого материала. Для вычисления величины максимальных напряжений под движущимся вальцом дорожного катка Н.Я. Хархутой была предложена следующая зависимость [5]:

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{q E_0}{R}}, \ кгс/см^2, \qquad (1)$$

где $q = \frac{Q_в}{B}$ – удельное линейное давление, *кгс/см*; $Q_в$ – статическая сила действия вальца катка на уплотняемый материал, *кгс*, B – ширина вальца, *см*; E_0 – модуль деформации материала, *кгс/см*^{2}; R – радиус вальца, *см*.

Расчеты контактных давлений по этой формуле показали хорошую сходимость результата расчетов с практикой. Наилучшие результаты получены для машин уплотняющих различные грунтовые материалы.

В случае уплотнения асфальтобетонных смесей укладываемых слоем в дорожное покрытие, закономерность изменения их физико-механических характеристик, таких как модуль деформации и предел прочности, в процессе производства работ сильно отличаются от грунтовых.

В первую очередь необходимо отметить влияние на эти характеристики изменения температуры асфальтобетонной смеси в процессе её уплотнения. Другой важной особенностью устройства асфальтобетонных покрытий является укладка и уплотнение тонких слоев на жестком, ранее уплотненном основании.

В связи с этим в выражении (1) не учитывается влияние толщины уплотняемого слоя на прочностные показатели самого асфальтобетона. Согласно этой зависимости, контактные напряжения, возникающие на слоях разной толщины, будут равны, что неверно, так как осадки слоев различной толщины различные. Для учета влияния толщины уплотняемого слоя на деформативные свойства уплотняемого материала Хархутой [6] была предложена зависимость изменения модуля деформации от относительной толщины уплотняемого слоя, представленная на рис. 1:

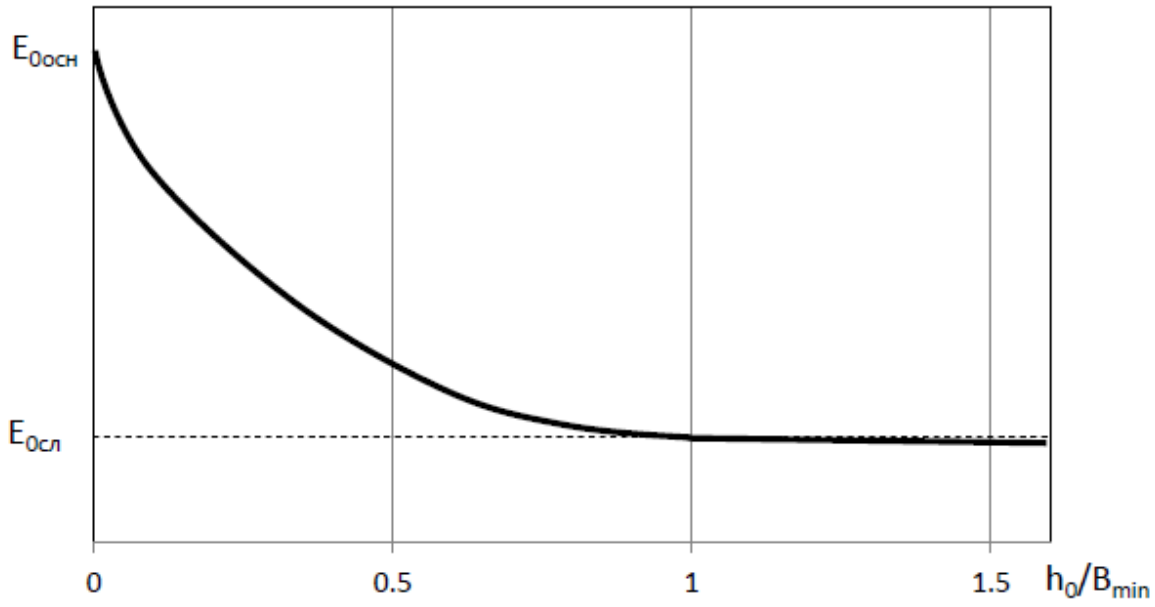


Рис. 1. Изменение модуля деформации от относительной толщины слоя асфальтобетона.

Здесь $E_{0осн}$ – модуль деформации основания, $E_{0слоя}$ – модуль деформации слоя, h_0 – толщина слоя, B_{min} – минимальный размер площади контакта уплотняющего рабочего органа со слоем. Эта зависимость дает возможность внести соответствующую поправку в формулу (1). Тем не менее конкретной величины этого параметра для того или иного случая получить невозможно.

На модуль деформации Ео и предел прочности σ_p влияет не только толщина, но также изменение плотности и температуры уплотняемого слоя. Так В.В.Бадаловым [7] получена зависимость приращения модуля деформации от числа проходов дорожного катка, представленная на рис. 2. Здесь ΔEn – приращение модуля деформации в зависимости от числа

проходов катка по одному следу, что эквивалентно приращению плотности слоя смеси; ΔЕт – приращение модуля деформации от изменения температуры уплотняемого слоя, остывания смеси в процессе её уплотнения. Отсюда видно, что в конце уплотнения скорость приращения модуля деформации затухает, в то время как темпы роста модуля деформации от снижения температуры возрастают.

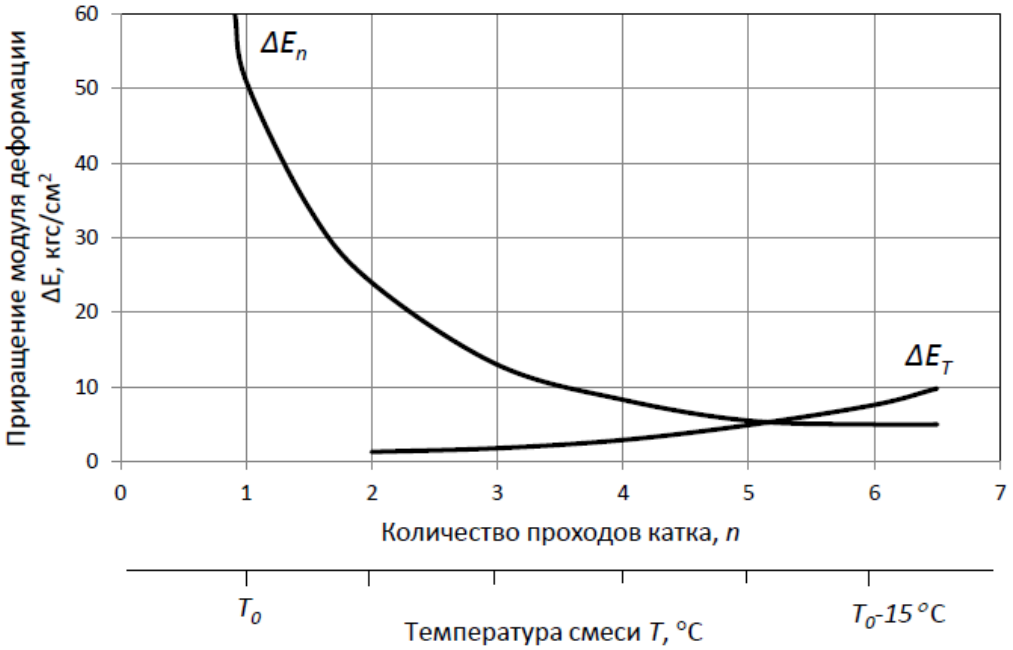


Рис. 2. Приращение модуля деформации в процессе уплотнения.

В ряде работ (Хархута Н.Я., Костельов М.П.) также отмечается, что модуль деформации слоя в конце уплотнения растет более высокими темпами, чем предел прочности уплотняемого материала. Так, в процессе уплотнения, предел прочности увеличивается в 3,5-4,0 раза, в то время как модуль деформации – в 13-15 раз. Последнее обстоятельство существенно усложняет ведение процесса уплотнения. С одной стороны для достижения высокой плотности необходимо значительно увеличить контактные давления, чтобы появилась возможность дальнейшего его деформирования. Однако, при этом мы можем превысить предел прочности уплотняемого слоя смеси, в результате чего он разрушится, что недопустимо. В связи с этим для достижения требуемой плотности, технология уплотнения предусматривает многократное приложение нагрузки на уплотняемый материал величиной, которая не превышает его предела прочности. При этом количество циклов воздействия на уплотняемый материал также ограничивается.

Зависимость необходимого количества циклов нагружения от соотношения контактных давлений рабочего органа катка и предела прочности материала, представлена на рис. 3 [8].

Из этой зависимости видно, что в случае превышения или уменьшения давлений под катком, необходимое количество циклов (проходов катка) приложения нагрузки возрастает.

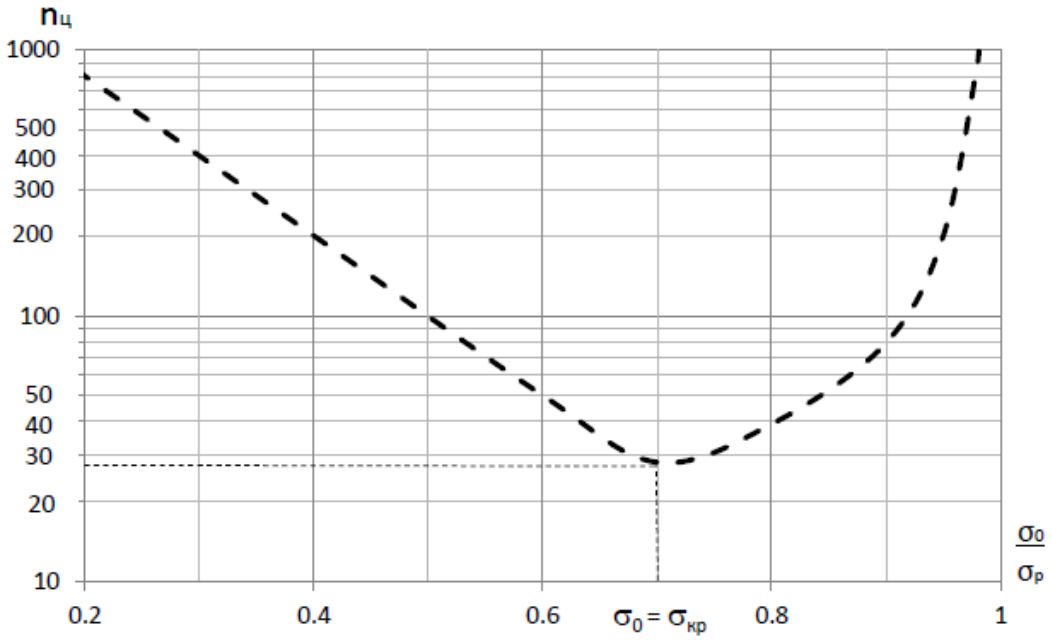


Рис. 3. Зависимость необходимого количества циклов нагружения от соотношения контактных давлений и прочности асфальтобетонной смеси.

Наименьшее количество проходов дорожного катка и, как следствие, наибольшая эффективность рабочего процесса соответствует уплотнению с контактными давлениями, близкими к критическим для данного типа и состояния асфальтобетонной смеси. Под критической нагрузкой понимаются такие давления, превышение которых может повлечь течение материала с нарушением его сплошности.

С учетом вышесказанного, М.П. Костельовым была предложена формула для расчета контактных давлений рабочего органа катка для уплотнения слоев дорожных покрытий, устраиваемых из горячей асфальтобетонной смеси [9]:

$$\sigma_к = \frac{3}{2}\sqrt[3]{\frac{Q_в^2 E_0}{B^2 D h_0}}, \text{ кгс/см}^2, \qquad (2)$$

где D – диаметр вальца, *см*; h_0 – толщина уплотняемого слоя, *см,* Q_B – сила тяжести, приходящаяся на валец.

В случае вибрационного способа уплотнения асфальтобетона в выражении (2) вместо Q_B необходимо использовать динамическую силу воздействия R_B, величина которой в течение одного рабочего цикла может изменяться в диапазоне от 60% до140% от амплитудного значения вынуждающей силы P_0. Поэтому для расчетов предложено использовать ее усредненное значение, соответствующее середине процесса уплотнения, т.е. $R_B = P_0$.

В процессе работы дорожных катков необходимо постоянно контролировать величину давлений, оказываемых вальцом катка на уплотняемый материал. В случае необоснованно высоких оптимальных значений может иметь место нарушение сплошности асфальтобетона, волнообразование и возникновение трещин и выпоров. В свою очередь при недостаточном воздействии на асфальтобетон со стороны рабочего органа катка увеличивается вероятность недоуплотнения слоев материала, снижению его эксплуатационных характеристик.

Наиболее эффективное уплотнение достигается путем создания напряжений близких к пределу прочности на данный момент времени [10]:

$$\sigma_к = \sigma_{\text{мах}} = (0{,}9 - 1{,}0)\sigma_р \text{ , Па.,} \qquad (3)$$

где $\sigma_р$ – предел прочности асфальтобетона.

Если для уплотнения грунтов это условие равновесия силовых параметров приемлемо, при этом идет активное развитие деформаций вблизи предела прочности уплотняемого материала. Для асфальтобетонных слоев, особенно верхнего «коврика износа», это условие граничит с тем, что в ряде случаев, когда давления под катком случайно превысят предел прочности грунта, сплошность уплотняемого материала может быть нарушена. Для асфальтобетонных дорожных покрытий это недопустимо.

Для предотвращения этой ситуации М.П. Костельов [8] предложил несколько щадящие условия уплотнения:

$$\sigma_к = \sigma_{кр} = (0{,}65 - 0{,}75)\sigma_р \text{ , Па,} \qquad (4)$$

где $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение, превышение которого может вызвать брак уплотняемой поверхности.

Другими словами, произошла замена максимальных контактных давлений $\sigma_{\text{мах}}$ в формуле (1) на давления соответствующие начальному этапу течения материала под нагрузкой, т.е. $\sigma_к = \sigma_{кр} \approx 0{,}7\ \sigma_{\text{мах}}$.

Все вышеотмеченные обстоятельства создают большие трудности в организации и выполнения технологической операции уплотнения слоев асфальтобетонных смесей.

В дополнение к этим ограничениям, смесь в тонком слое быстро остывает примерно 1°С в минуту. Нормированный наиболее эффективный температурный диапазон уплотнения находится в пределах от 140°С до 75°С. Время остывания смеси, для средних условий производства, составляет порядка 60-65 мин. Этим временем ограничивается и длина захватки (длина участка уплотнения).

В таких стесненных условиях по времени и пространству необходимо организовать процесс уплотнения так, чтобы уплотняющая нагрузка под вальцами катков соответствовала условию (4) на протяжении всего технологического цикла уплотнения. Этот процесс выполняется звеном дорожных катков, имеющих различные силовые параметры воздействия на

слой. Поэтому его организация чрезвычайно сложна и подвержена влиянию человеческого фактора.

Процесс уплотнения горячей асфальтобетонной смеси можно схематически представить в виде графика, показанного на рисунке 4. По оси ординат температура слоя уплотняемой смеси, а по оси абсцисс силовой параметр дорожного катка q/R, где q – линейное давление под вальцом катка, представляет собой отношение силы тяжести Q, приходящейся на валец, к ширине вальца – B ($q = Q/B$), а R – радиус вальца. Параметр q/R является эквивалентом контактному давлению под вальцом.

На рис. 4 кривые *а* и *б* ограничивают возможный диапазон изменения температуры слоя в процессе уплотнения. Линиями *Л*, *С* и *Т* указаны границы рационального режима работы дорожных катков легкого (Л), среднего (С) и тяжелого (Т) типов.

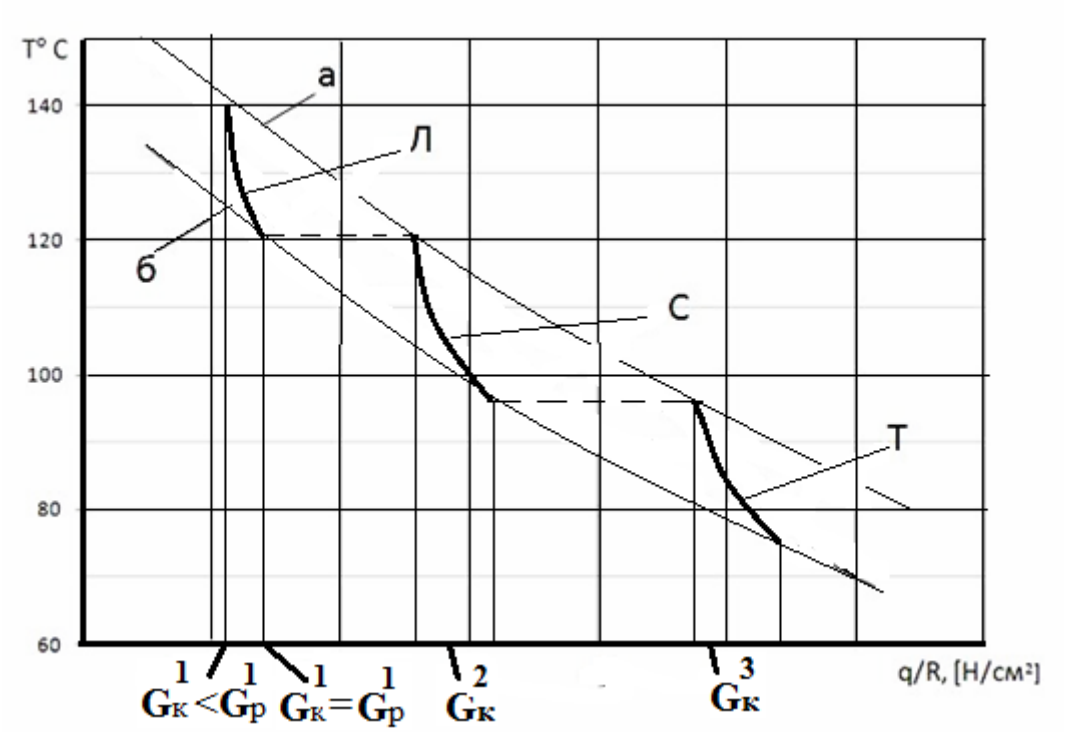


Рис. 4. Технологическая схема укатки слоя горячей асфальтобетонной смеси звеном дорожных катков последовательно легким, средним и тяжелым.

Здесь, на первом этапе, уплотнение производит легкий каток с начальным контактным давлением менее предела прочности смеси $\sigma^1_к < \sigma^1_р$. Этот каток начинает работу при температуре порядка 140-135°С и по мере его работы плотность смеси растет, а её температура снижается в результате остывания. За счет изменения этих параметров первоначальная прочность смеси изменяется – растет, поэтому по достижению $\sigma^1_к \rightarrow \sigma^1_р$ наступает момент смены легкого катка на более тяжелый. К этому моменту

давление под легким катком несколько изменилось - возросло за счет уменьшения площади контакта вальца со слоем покрытия и составило $\sigma^1_k=\sigma^1_k$', однако оно незначительно увеличивает первоначальное давление катка. Это давление должно соответствовать начальному контактному давлению следующего более тяжелого катка σ^1_k'$=\sigma^2_k$. Аналогичным образом идет смена катка среднего типа (С) на каток тяжелого типа (Т).

Проблема заключается в том, что сложно точно определить когда и с какими начальными параметрами выпускать легкий каток, сколько выполнять проходов по следу и когда заменять его на другой каток с более высокими силовыми параметрами воздействия на слой.

Здесь, на ограниченном участке работ, находится три и более катков, в зависимости об объема производства. Каждая машина, со своим оператором, должна последовательно выполнить по 4-5 проходов по следу в определенной последовательности, от края к середине с перекрытием слоев, затем от другого края полосы – к середине, не сбиться со счета и уйти во время – освободив место для работы другому более тяжелому катку.

При этом не учитываются еще возможные технологические отлучки того или иного катка, например, заправка водой и т.п. Воистину процесс трудно управляем и сильно подвержен влиянию человеческого фактора.

В настоящее время на помощь приходит автоматика управления процессом, определяющая момент окончания уплотнения катком данного типа. Такие системы разработаны и устанавливаются на вибрационных катках фирм Ammann, Dynapac, Vogel, Расскат и др. Это в свою очередь существенно облегчает управление технологическим процессом уплотнения. Однако влияние человеческого фактора и необходимость четкой организации последовательности применения катков различных типов в стесненных условиях производства остается пока неразрешимой проблемой дорожного строительства. Эти недостатки существующей технологии приводят к снижению качества работ и производительности дорожного комплекса. Главным недостатком снижения качества работ при этом является неоднородность плотности дорожного полотна, приводящая к преждевременному локальному разрушению дорожного покрытия.

В настоящее время ряд фирм выпускают дорожные катки, которые позволяют регулировать силовое воздействие катка в широких пределах. Это достигается за счет регулирования вибрационных параметров побудителя колебаний, помещаемого внутрь вальца катка. Применение таких вибрационных катков дало возможность уменьшить количество типажа машин применяемых для уплотнения дорожных покрытий, но не позволяет полностью исключить отмеченные выше недостатки существующей технологии уплотнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышается качество уплотнения. Багдасаров С.М., Варганов и др. Автомобильные дороги. Дороги. М. 1970, №6, С. 5.
2. Влияние способов уплотнения на ровность асфальтобетонных покрытий. Белоусов Л.И., Хархута Н.Я. Автомобильные дороги. Дороги. М. 1974, №6, С. 20.
3. Качество асфальтобетона: методы оценки и требования. Руденский А.В. Автомобильные дороги. Дороги. М. 1975, №3, С. 11.
4. Опыт повышения качества уплотнения асфальтобетонного покрытия. Шереметьев Б.М., Ермак Е.И. Строительные и дорожные машины. СДМ-Пресс, М., 1981, №10, С. 12.
5. Дорожные машины. Хархута Н.Я. и др. Машиностроение, 1968, стр. 36.
6. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий. Хархута Н.Я. Труды СОЮЗДОРНИИ, М., 1980, С. 56.
7. В.В.Бадалов Исследование катков при уплотнении асфальтобетонных дорожных покрытий. Автор. на соиск. учен. степ. к.т.н., Л.,1974.
8. Уплотнению асфальтобетона требуется обновленное поколение дорожных катков (технологические заметки, размышления, прогнозы). Костельов М.П. Каталог-справочник “Дорожная техника”, Славутич, Санкт-Петербург, 2003, С.13.
9. Как выбирать дорожный каток для уплотнения асфальтобетона. Костельов М.П. Каталог-справочник “Дорожная техника”, Славутич, Санкт-Петербург, 2000, С.63.
10. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей. Пермяков В.Б., Захаренко А.В. Строительные и дорожные машины. СДМ-Пресс, М., 1989, № 5, С. 12-13.

УДК 622.62

В.В. Кривда

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО АВТОТРАНСПОРТА С МЕХАНИЗМОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС (МЦМ) В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ УКЛОНОВ АВТОДОРОГ



Виталий Валерьевич Кривда, аспирант
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,
г. Днепропетровск, Украина,
E-mail: vitaliy.krivda@yandex.ru
тел. +380509208080

Аннотация.

Предложена возможность применения карьерного автотранспорта с механизмом изменения положения центра масс при повышенном уклоне автомобильной дороги и определение зависимости величины угла откоса бортов карьера от величины продольного уклона автомобильной дороги.

Ключевые слова: угол откоса борта, автосамосвал.

V.V.Krivda

THE POSSIBILITY TO USE MOTOR TRANSPORT WITH MECHANISM CHANGE OF CENTER MASS IN SITUATIONS OF HIGH ROAD SURFACE ANGLE

Vitaliy.V. Krivda, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine,
e-mail: vitaliy.krivda@yandex.ru

Abstract

Proposed the possibility to use the dump truck with mechanism change center of mass of high road surface angle. And the determination of the dependence of the angle of slope of the pit walls longitudinal slope of the road.

Key words: pit wall slope angle, dump truck.

Введение

Актуальность работы. Одной из наиболее актуальных проблем разработки глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых от-

крытым способом является дополнительный разнос бортов карьеров для размещения вскрывающих выработок, где объем составляет десятки миллионов кубометров вскрышных пород. В первую очередь это обусловлено тем, что размещение вскрывающих выработок ведет к выполаживанию бортов карьера по сравнению с их устойчивыми значениями. Это характерно для карьеров с небольшой длиной дна, в которых уменьшение протяженности уступов с глубиной происходит наиболее интенсивно. Увеличение уклонов автодорог позволяет сократить дополнительной разнос бортов и повысить экономические показатели открытого способа разработки. Решая данную задачу, проведем исследование зависимости угла разноса бортов карьера от продольного уклона автодороги.

В общем случае объем дополнительного разноса бортов ($V_Д$, м^3) от размещения вскрывающих выработок (съездов) можно определить по формуле [7]

$$V_Д = \frac{0{,}5 \cdot H_К^2 \cdot B_{ТБ} \cdot k_{РТР}}{i_р}, \quad (1)$$

где $H_К$ – глубина карьера (вскрытия), м;

$B_{ТБ}$ – ширина транспортной бермы (съезда), м;

$k_{Р.ТР}$ – коэффициент развития трассы;

$i_р$ – руководящий уклон съезда, доля ед.

Отрицательным аспектом расчета по формуле (1) является тот факт, что протяженность верхних горизонтов значительно больше протяженности нижних горизонтов, и, соответственно, длина разноса верхних горизонтов значительно превышает длину съездов, расположенных под ними на нижних горизонтах. Чем больше кривизна борта, тем больше разница между длиной съезда и длиной разноса участков верхних горизонтов, расположенных над этим съездом.

Анализ современных методов расчета дополнительного разноса бортов карьеров показывает, что наиболее приемлемым из них является метод, разработанный канд. техн. наук Г. Г. Саканцевым (ИГД УрО РАН).

При криволинейной форме борта объем дополнительного разноса можно определить по формуле [7]

$$V_Д = 0{,}5 L_р H_К B_{ТБ}, \quad (2)$$

где $L_р$ – длина разноса борта по поверхности, необходимая для ввода вскрывающих выработок на глубину $H_К$, м.

При спиральной форме трассы $L_р$ может быть определена по формуле

$$L_р = L_В \cdot \frac{\varphi}{2\pi},$$

где $L_В$ – периметр карьера по поверхности, м;

φ – угол, описываемой трассой, рад.

Угол, описываемый трассой, определяется по формуле логарифмической спирали

$$\varphi = \frac{2\pi(\lg \rho_0 - \lg \rho_n)}{\lg \tau},$$

где ρ_0 – полярный радиус начала съезда, м; ρ_n – полярный радиус конца съезда, м;

$\lg \tau$ – безразмерный коэффициент расчета логарифмической спирали.

Последний находится из условия

$$\tau = e^{2\,\pi\,\mathrm{tg}\alpha}$$

где α – угол между прямой, проходящей через центр спирали, и касательной к спирали в точке пересечения этой прямой со спиралью.

Угол касательной к логарифмической спирали определяется по формуле

$$\arccos\alpha = \frac{\rho_0 - \rho_n}{S},$$

где S – длина пути логарифмической спирали, представляющая длину трассы, м.

При петлевой, тупиково-поступательной или другой сложной криволинейной форме трассы длина разноса борта определяется как сумма отдельных длин, рассчитанных для простых участков трассы. Для прямолинейных участков они находятся по формуле (1), для криволинейных – по формулам (2) [3].

Вместе с тем, приведенный метод следует проанализировать с возможностью перехода на повышенный уклон автодороги, что обусловлено применением механизма (МЦМ), позволяющего изменять центр масс и межосевое расстояние карьерной автомобильной техники, сохраняя при этом тяговые свойства электродвигателей.

Исследования показали, что при наличии возможности изменения межосевого расстояния (базы автосамосвала рис.1), применив механизм для изменения положения центра масс и межосевого расстояния (МЦМ), происходит значительное уменьшение необходимой силы тяги при движении по дороге с продольным уклоном 7%, о чем свидетельствуют результаты, представленные на рис. 2 [6].

Сохранение тяговых характеристик электродвигателей автосамосвалов с МЦМ дает возможность увеличить продольный уклон автомобильной дороги на 23% от имеющегося.

Поскольку вся совокупность горнотехнических условий в случае применения автосамосвала с МЦМ делится на две области, определяющие два основных режима работы автосамосвала (с полным применением МЦМ, без него), для каждого режима работы автосамосвала с МЦМ определена

возможность перехода на повышенный уклон дороги и величина объема горнокапитальных работ.

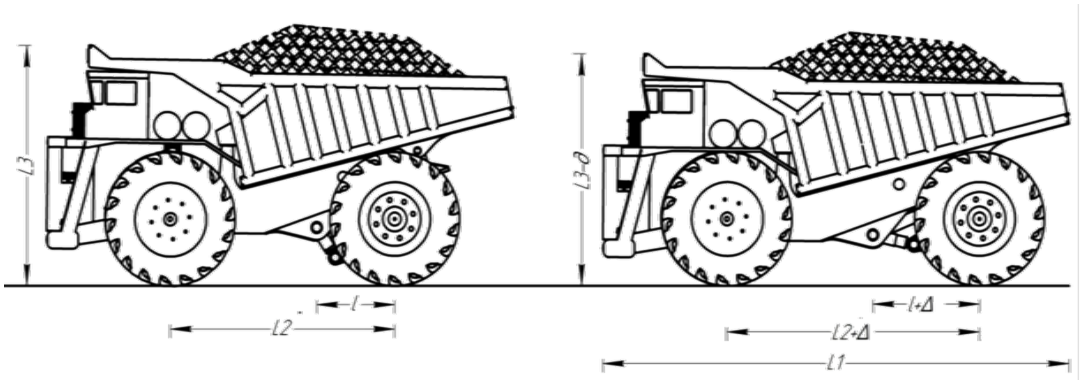


Рис. 1. Карьерный автосамосвал с обычным и измененным межосевым расстоянием

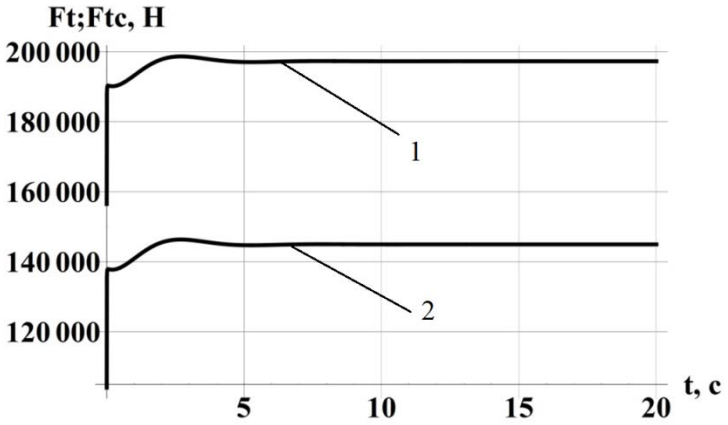


Рис. 2. Сила тяги всей системы, приложенная к ведущим колесам по дороге с продольным углом наклона *i* =7%:

1 – с обычной базой (межосевое расстояние *L*=5,3м);

2 – с измененной базой (межосевым расстоянием *L*=5,96м).

При строительстве моделей карьеров в системе КОМПАС 3D с различным уклоном вскрывающих выработок, рассчитывались объемы вскрыши в конечных контурах карьера и производилось сравнение этих объемов. Так, при сравнительном анализе взятых данных карьера ПАО «Полтавский ГОК», увеличение уклонов вскрывающих выработок с 7 % (проектный вариант) до 9 % имеющих по проекту на конец отработки глубину 302 м, сокращение объемов вскрыши составляет 25 млн. м^3, т. е. 13,4 % от общих объемов в контуре. Разница в погоризонтных объемах вскрыши изменяется от 0-4 % на нижних горизонтах, до 11-20,5 % - на верхних и средних.

Расположение и порядок перемещения фронта рабочих уступов оказывают существенное влияние на объемы горнокапитальных работ, вели-

чину внутрикарьерной деятельности транспортирования, объемы работ по подготовке горизонтов, число рабочих уступов и протяженность фронта работ. В случае транспортирования пород на внешние отвалы, для системы разработки с применением автомобильного транспорта, характерной расчетной формулой по определению объемов горнокапитальных работ является

$$V = b \cdot H_к \cdot L_{П.ДОР} + H_к^2 \cdot L_{П.ДОР} \cdot ctg\gamma, \quad (3)$$

где γ – угол откоса нерабочего борта карьера соответственно при уклоне вскрывающих выработок i_1и i_2, град.; b – горизонтальное расстояние от нерабочего борта карьера до полезного ископаемого, соответствующего высоте $H_к$, м.

Преобразуя формулу 3, найдем значения угла откоса бортов, которые в свою очередь будет зависеть от протяженности и объема выработок

$$ctg\gamma = \frac{V - b \cdot H_к \cdot L_{П.ДОР}}{H_к^2 \cdot L_{П.ДОР}}, \quad (4)$$

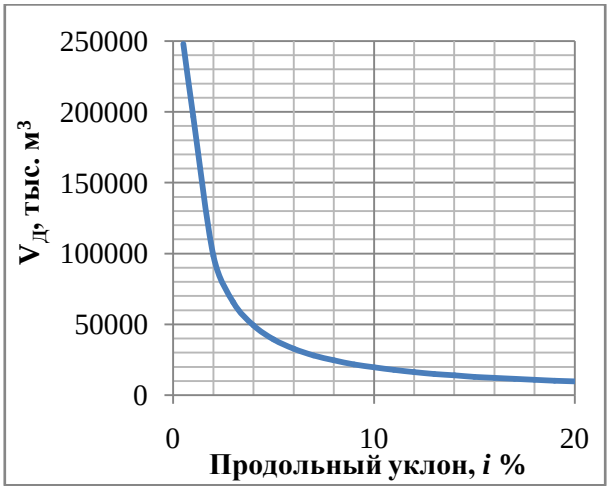


Рис. 3. Объем дополнительного разноса бортов с учетом применения МЦМ ($V_Д$, м^3)

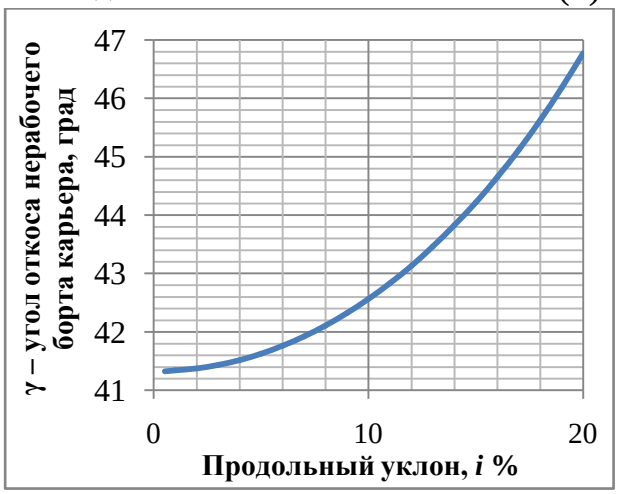


Рис. 4. Изменения угла разноса борта карьера в зависимости от величины продольного уклона автомобильной дороги

Для универсальной и упрощенной формы определения сокращения объемов дополнительного разноса бортов карьера при спиральной форме трассы, с учетом определения угла откоса борта можно найти из выражения

$$\Delta V = \frac{1}{3}\pi H_к (R_1^2 - R_{11}^2 + R_1 R_2 - R_{11} R_2), \quad (5)$$

где R_1, R_2 – радиусы окружности соответственно поверхности и дна карьера, м;

R_{11} – радиус окружности поверхности карьера при повышенном уклоне автодороги, м.

Преобразуя формулу 5 для расчета объема разноса бортов эллиптической формы, получаем

$$\Delta V = \frac{1}{3} H_к (S_{\max} - S'_{\max} + \sqrt{(S_{\min}(S_{\max} - S'_{\max})}),$$

где S_{max}, S_{min} – площадь карьера по поверхности и по дну при первоначальном значении продольного уклона спирального съезда, м^2;

S'_{max} – площадь карьера по поверхности при повышенном продольном уклоне, м^2.

Для эллиптической формы дна карьера

$$S_{\min} = \frac{\pi}{4} \cdot a \cdot b,$$

$$S_{\max} = \frac{\pi}{4} \cdot a_{\max} \cdot b_{\max},$$

где a_{max},b_{max} - соответственно, длина и ширина карьера по поверхности, м.

$$a_{\max} = a + 2H_к \, ctg\gamma,$$

$$b_{\max} = b + 2H_к \, ctg\gamma.$$

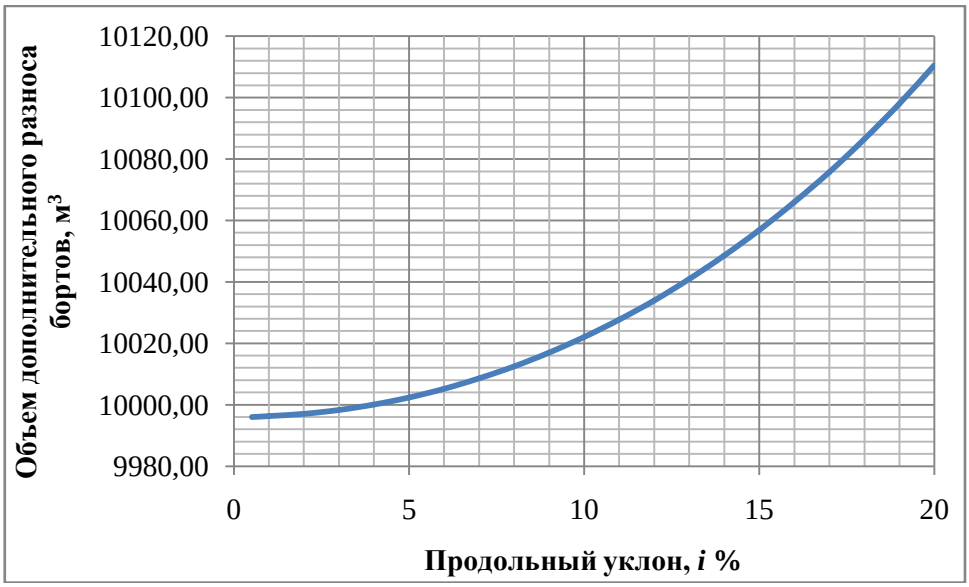
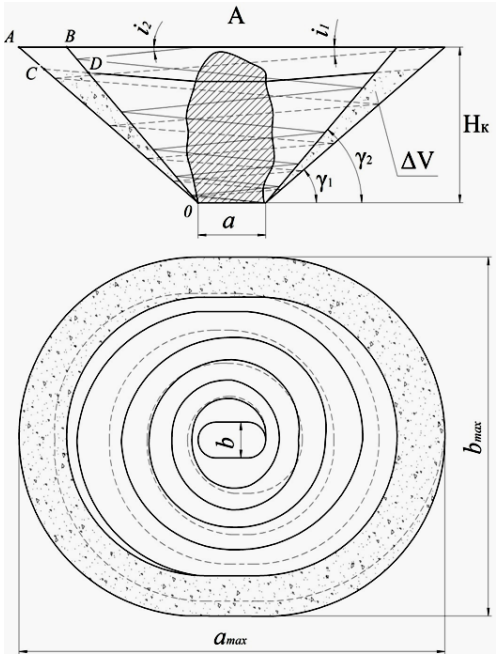


Рис. 5. Зависимость объема разноса бортов карьера от величины продольного уклона автодороги

В случае применения петлевого съезда угол откоса нерабочего борта на момент погашения определяется количеством и протяженностью участков с постоянным направлением трассы. Исходными параметрами для определения числа количества поворотов на петлевой трассе являются: руко-

водящий уклон съезда, высота уступа, протяженность нерабочего борта, занятая съездом, глубина карьера, угол откоса торцевых частей. При расчетах определяется число уступов, вскрытых в одном направлении, количество изменений направления петлевой трассы, угол откоса нерабочего борта.



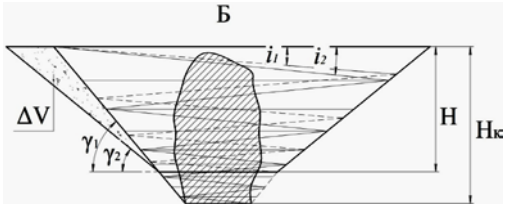


Рис. 6. Технологические схемы сокращения объемов разноса бортов карьера при переходе на повышенный уклон автодорог:
А – спирального типа;
Б – петлевого типа.

На рис. 6 изображено: a_{max}, b_{max}, a, b – длина и ширина карьера соответственно по поверхности и основанию; H – проектная глубина карьера; γ_1, γ_2 – угол откоса нерабочего борта карьера соответственно при уклоне вскрывающих выработок i_1 и i_2; $H_к$ – глубина перехода на повышенный уклон i_2; ΔV – сокращение объема разноса бортов карьера [1].

Число витков спирали m при глубине карьера $H_к$ равно

$$m = \frac{2H_к}{\pi \cdot i(a+b) + 2H_к ctg(\gamma)},$$

В процессе исследований были рассмотрены две наиболее распространенные схемы (рис. 3). При схеме А нерабочий борт карьера формируется под углом γ_1, соответствующим руководящему уклону вскрывающих выработок i_1. Положение нерабочего борта на конец разработки соответствует линии АС0. При достижении глубины карьера $H_к$, принимая решение о переходе на повышенный уклон i_2 где $i_2 > i_1$, новое положение нерабочего борта ACD0 будет соответствовать углу погашения γ_2 ($\gamma_2 > \gamma_1$). Образуется переходная зона CD, которая представляет выположенный участок нерабочего борта[1].

К достоинствам схемы можно отнести простоту ее реализации на практике, возможность принятия решения о переходе в любой период разработки карьера, а также возможность организации внутреннего отвалооб-

разования в переходной зоне при вывозке вскрышных пород с глубоких горизонтов.

При рассмотрении второго варианта в схеме А отсутствует переходная зона. Нерабочий борт формируется по линии BD0, причем верхняя часть нерабочего борта B0 отстраивается под углом γ_2, соответствующим уклону i_2. К достоинствам схемы можно отнести то, что с глубиной карьера (глубиной перехода на повышенный уклон) сокращаемые объемы вскрыши падают медленно, что позволяет получать ощутимый эффект даже при значительной глубине перехода.

Выводы

Установлено, что в качестве основного технического критерия выбора оптимального уклона целесообразно использовать на автотранспорте МЦМ. Рассматриваемые уклоны при оптимизации должны быть в диапазоне оптимального значения уклона по физическим параметрам и предельного значения уклона, но не выше технологически обусловленного. Эффективность перехода на повышенные уклоны в значительной степени определяется технологической схемой перехода. В результате исследований обоснованы два варианта технологического состояния карьерного автомобильного транспорта, отличающиеся необходимыми тягово-скоростными критериями для рабочего процесса на том или ином участке трассы. Процессы перехода напрямую связаны с безопасностью транспортирования горной массы.

Глубина и эффективность перехода на повышение уклона определяется величиной сокращаемых объемов вскрыши, объемом автотранспортных перевозок, а также экономическими показателями – себестоимостью транспортирования автосамосвалами горной массы и себестоимостью вскрышных работ. Предложены аналитические формулы для предварительной оценки эффективности перехода на повышенные уклоны.

На примере единичного варианта карьера ПАО «Полтавский ГОК» проведено технико-экономическое сравнение автомобильных трасс с уклонами 6 – 20 % для автосамосвалов БелАЗ-7512. Установлено, что увеличение уклона с 7-8 % (проектный вариант) до 10-12 % позволит сократить затраты на разработку до 17%. Рекомендовано увеличение уклона автодорог при движении груженых автосамосвалов на подъем до 10 %, на спуск - до 12 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворошилов Г.А. Обоснование оптимальных уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Горшков Э. В. - Свердловск, 1984. - 212 с.
2. Горшков Э. В. Обоснование рациональных параметров технологического автотранспорта при повышенных уклонах карьерных автодо-

рог [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Горшков Э. В. - Свердловск, 1984. - 212 с.
3. Журавлев А.Г.Обоснование параметров транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами с энергосиловой становкой [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Журавлев, А.Г.- Екатеринбург: РАН УИГД, 2007.-176 с.
4. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы [Текст] / П. Л. Мариев [и др.] - СПб.: Наука, 2004, - 425 с.
5. Категории карьерных дорог. // Автомобильная промышленность, № 2, 2003, С. 17 – 19
6. Кривда В.В. Обоснование эксплуатационно-технологических параметров карьерных автосамосвалов // Системные технологии. Региональный межвузовый сборник научных работ, № 12 - Днепропетровск, 2013, С. 35
7. Саканцев Г. Г. Исследование возможности и условий применения крутых уклонов вскрывающих выработок на глубоких карьерах [Текст] / Г. Г. Саканцев // Изв. УГГУ. Сер.: Горное дело. -2005. - Вып. 21. - С. 37-44.

УДК 622.271.022

С.Ю. Кувшинкин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ И МОЩНОСТЕЙ ОСНОВНЫХ ПРИВОДОВ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА БЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ ГРАФИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ



Сергей Юрьевич Кувшинкин, канд. техн. наук, доцент, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Россия, Санкт-Петербург, minermech@mail.ru

Аннотация

Приведены и обоснованы аналитические зависимости, связывающие геометрические параметры, необходимые для расчета усилий и мощностей основных приводов карьерного экскаватора с конструктивными параметрами машины и параметрами забоя – высотой забоя (развала) и высотой разгрузки. Использование этих зависимостей значительно облегчает и ускоряет эксплуатационные расчеты, так как исключает наличие элементов графического решения.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, рабочее оборудование, геометрические параметры.

S. Kuvshinkin

DEFINED FORCE AND CAPACITY OF MAJOR MINING SHOVELS DRIVE WITHOUT THE ELEMENTS OF GRAPHIC SOLUTIONS

S. Kuvshinkin, National mineral resources university «Mining University», Russia, e-mail: minermech@mail.ru

Abstract

Presented and validated analytical expressions relating the geometric parameters needed to calculate the force and capacity of major mining shovels drive with the design parameters of the machine and face parameters - face height and dump heights. The use of these relationships is much easier and quicker operational calculations, as it excludes the presence of elements of graphic solutions.

Key words: mining shovel, front-end equipment, geometric parameters.

Для расчета усилий и мощностей основных приводов карьерного экскаватора, а также определения массы противовеса необходимо знать ряд геометрических параметров, определяющих положение рабочего оборудования машины при копании, а также в периоды поворотов на разгрузку и в забой [3, 4].

Такими геометрическими параметрами являются: углы наклона подъемного каната и рукояти; расстояния от точек приложения действующих на рабочее оборудование сил до оси напорного вала; расстояния от центров масс механизмов и конструкций до оси вращения поворотной платформы.

Традиционно эти величины определяют графически, используя схемы рабочего оборудования лопаты в забое, выполненные с соблюдением масштаба. В данной работе предложена методика аналитического расчета геометрических параметров, позволяющая полностью исключить элементы графического решения в эксплуатационных расчетах карьерных механических лопат [1, 2, 5, 6, 7, 8, 9 ,10].

Для вывода зависимостей, определяющих искомые геометрические параметры, приняты два допущения.

1. В момент начала копания рукоять вертикальна, зубья ковша находятся на уровне стоянки экскаватора.

2. Траектория копания представляет собой дугу окружности, т.е. величина заглубления ковша не оказывает заметного влияния на вылет рукояти.

Для любого положения ковша относительно забоя при черпании породы длина передней (выдвинутой из седлового подшипника) части рукояти будет определяться из выражения:

$$L_{\text{р.пер}} = H_{\text{в}} + L_{\text{к}} + t, \qquad (1)$$

где $H_{\text{в}}$ – высота напорного вала, м,

$L_{\text{к}}$ – длина ковша, м,

t – величина заглубления ковша (толщина стружки).

Соответственно задняя, не вдвинутая в седловой подшипник часть рукояти будет:

$$L_{\text{р.зад}} = L_{\text{р}} - H_{\text{в}} + L_{\text{к}} - t. \qquad (2)$$

Величина заглубления t ковша на вылет рукояти влияет незначительно, поэтому в рамках принятого допущения о том, что траектория резания есть дуга окружности, величиной t пренебрегаем. С учетом вышеизложенного получим:

$$L_{\text{р.пер}} = H_{\text{в}} - L_{\text{к}}, \qquad (3)$$

$$L_{\text{р.зад}} = L_{\text{р}} - H_{\text{в}} + L_{\text{к}}. \qquad (4)$$

Анализируя конструкции карьерных экскаваторов производства «ИЗКАРТЭКС», можно принять, что седловой подшипник находится на рас-

стоянии $0{,}4L_c$ от пяты стрелы (L_c – длина стрелы). Тогда высота напорного вала может быть определена из выражения:

$$H_в = h_{пс} + 0{,}4L_c \sin\alpha_c . \quad (5)$$

где $h_{пс}$- высота пяты стрелы, м,

α_c- угол наклона стрелы, рад.

Используя выражение (5), а также выразив по известной эмпирической формуле [2, 6, 7, 8, 9, 10] длину ковша через его вместимость E, получим:

$$L_{р.пер} = h_{пс} + 0{,}4L_c \sin\alpha_c - 0{,}924\sqrt[3]{E} , \quad (6)$$

$$L_{р.зад} = L_р - h_{пс} - 0{,}4L_c \sin\alpha_c + 0{,}924\sqrt[3]{E} . \quad (7)$$

Рассмотрим произвольное положение рукояти при черпании (рис. 1).

На рис. 1 точка O соответствует оси напорного вала, точка D - положению зубьев ковша. При этом $OD=L_{р.пер}+L_к$, $FD=H_в-H$, где H – высота забоя. Из треугольника OFD определим $\gamma_{рк}$ – угол наклона рукояти к горизонтали при копании.

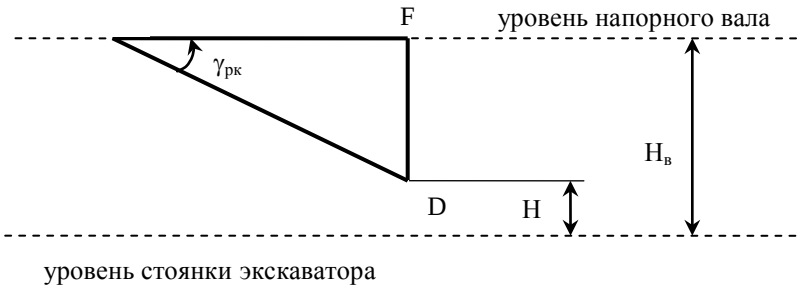


Рис. 1. Схема к определению угла наклона рукояти к горизонтали

$$\sin\gamma_{рк} = \frac{FD}{OD} = \frac{H_в - H}{L_{р.пер} + L_к} = \frac{H_в - H}{H_в} = 1 - \frac{H}{H_в},$$

$$\sin\gamma_{рк} = 1 - \frac{H}{h_{пс} + 0{,}4L_c \sin\alpha_c}, \quad (8)$$

$$\gamma_{рк} = \arcsin\left(1 - \frac{H}{h_{пс} + 0{,}4\sin\alpha_c}\right). \quad (9)$$

Определим $\beta_к$ – угол наклона подъемного каната при копании. Для этого рассмотрим треугольник OKM (рис. 2).

На рис. 2 точка O соответствует оси напорного вала, точка K – головному блоку, точка M – точка крепления подъемного каната к коромыслу ковша.

$$OM = L_{р.пер} = H_в - L_к .$$

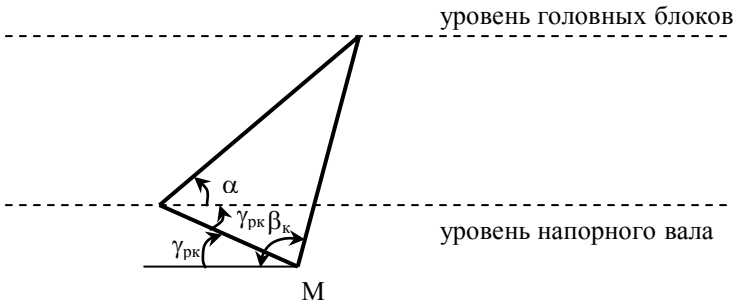


Рис. 2. Схема к определению угла наклона подъемных канатов к горизонтали

В свою очередь, углы треугольника *OKM* могут быть определены через угол наклона стрелы, угол наклона рукояти и угол наклона подъемных канатов.

$$\angle KOM = \gamma_{рк} + \alpha_с,$$

$$\angle KMO = \beta_к - \gamma_{рк},$$

$$\angle OKM = \pi - (\angle KMO - \angle KOM) = \pi - (\gamma_{рк} + \alpha_с + \beta_к - \gamma_{рк}),$$

$$\angle OKM = \pi - \alpha_с - \beta_к.$$

Используя формулу тангенсов, можем записать:

$$tg(\pi - \alpha_с - \beta_к) = \frac{(H_в - L_к)\sin(\gamma_{рк} + \alpha_с)}{0{,}6L_с + R_б - (H_в - L_к)cos(\gamma_{рк} + \alpha_с)}.$$

Выразив угол наклона подъемных канатов к горизонтали через обратную тригонометрическую функцию, получим:

$$\beta_к = \pi - \alpha_с - arctg\frac{(H_в - L_к)\sin(\gamma_{рк} + \alpha_с)}{0{,}6L_с + R_б - (H_в - L_к)\cos(\gamma_{рк} + \alpha_с)} \qquad (10)$$

Пренебрегая толщиной стружки и используя ранее полученные выражения, определим расстояния от точек приложения соответственно касательной составляющей силы сопротивления породы копанию, усилия подъема, силы тяжести ковша с породой, силы тяжести рукояти до оси напорного вала в период копания.

$$r_{1к} = L_{р.пер} + L_к = H_в = h_{пс} + 0{,}4L_с \sin\alpha_с, \qquad (11)$$

$$r_{2к} = L_{р.пер} = h_{пс} + 0{,}4L_с \sin\alpha_с - 0{,}924\sqrt[3]{E}, \qquad (12)$$

$$r_{3к} = L_{р.пер} + 0{,}5L_к = h_{пс} + 0{,}4L_с \sin\alpha_с - 0{,}462\sqrt[3]{E}, \qquad (13)$$

$$r_{4к} = L_{р.пер} - 0{,}5L_р = h_{пс} + 0{,}4L_с \sin\alpha_с - 0{,}924\sqrt[3]{E} - 0{,}5L_с. \qquad (14)$$

Аналогичным образом были получены выражения для определения углов наклона подъемного каната и рукояти к горизонтали, расстояний от точек приложения действующих на рабочее оборудование сил до оси

напорного вала в периоды поворотов на выгрузку и в забой, необходимых для расчета приводов подъема и напора, а также выражения для определения расстояний от центров масс механизмов и конструкций до оси вращения поворотной платформы, необходимых для расчета привода поворота [[2, 6, 7, 8, 9, 10]]. Пропуская промежуточные математические выкладки, приведем лишь конечный результат.

Угол наклона рукояти к горизонтали:

$$\gamma_{\text{рр}} = arctg\frac{h_{\text{пс}} + 0{,}4L_{\text{с}}\sin\alpha_{\text{с}} - H_{\text{р}} - 0{,}9\sqrt[3]{E}}{R_{\text{р}} - r_{\text{пс}} - 0{,}4L_{\text{с}}\cos\alpha_{\text{с}}}, \quad (15)$$

где: $H_{\text{р}}$, $R_{\text{р}}$ – соответственно высота и радиус разгрузки, м,

$r_{\text{пс}}$ – радиус пяты стрелы, м.

Расстояния от точек приложения соответственно усилия подъема, силы тяжести ковша с породой (или порожнего ковша), силы тяжести рукояти до оси напорного вала:

$$r_{2\text{р}} = L'_{\text{р.пер}} = \frac{R_{\text{р}} - r_{\text{пс}} - 0{,}4L_{\text{с}}\cos\alpha_{\text{с}}}{\cos\gamma_{\text{рр}}} - 0{,}462\sqrt[3]{E}, \quad (16)$$

$$r_{3\text{р}} = L_{\text{р.пер}} + 0{,}5L_{\text{к}} = \frac{R_{\text{р}} - r_{\text{пс}} - 0{,}4L_{\text{с}}\cos\alpha_{\text{с}}}{\cos\gamma_{\text{рр}}}, \quad (17)$$

$$r_{4\text{р}} = L'_{\text{р.пер}} - 0{,}5L_{\text{р}} = \frac{R_{\text{р}} - r_{\text{пс}} - 0{,}4L_{\text{с}}\cos\alpha_{\text{с}}}{\cos\gamma_{\text{рр}}} - 0{,}462\sqrt[3]{E} - 0{,}5L_{\text{р}}. \quad (18)$$

Угол наклона подъемного каната к горизонтали:

$$\beta_{\text{р}} = \pi - \alpha_{\text{с}} - arctg\frac{r_{2\text{р}}\sin(\alpha_{\text{с}} + \gamma_{\text{рр}})}{0{,}6L_{\text{с}} + R_{\text{б}} - r_{2\text{р}}\cos(\alpha_{\text{с}} + \gamma_{\text{рр}})}. \quad (19)$$

Расстояния от центров масс соответственно механизма напора, стрелы, ковша и рукояти до оси вращения поворотной платформы:

$$r_{\text{н}} \approx r_{\text{пс}}, \quad (20)$$

$$r_{\text{с}} = r_{\text{пс}} + 0{,}5L_{\text{с}}\cos\alpha_{\text{с}}, \quad (21)$$

$$r_{\text{к}} = R_{\text{р}}, \quad (22)$$

$$r_{\text{р}} = R_{\text{р}} - (0{,}462\sqrt[3]{E} - 0{,}5L_{\text{р}})\cos\gamma_{\text{рр}}. \quad (23)$$

Следует отметить, что при расчете подъемных и напорных усилий [2, 8] знак перед слагаемыми, содержащими $\sin\gamma_{\text{рк}}$, $\sin\gamma_{\text{рр}}$ будет получаться автоматически в процессе вычисления величин $\gamma_{\text{рк}}$, $\gamma_{\text{рр}}$ (см. формулы 9 и 15) при условии, что перед скобкой будет стоять знак минус. Например, при копании или разгрузке на высоте, меньшей высоты напорного вала вычисленные по формулам 9 и 15 значения $\gamma_{\text{рк}}$ и $\gamma_{\text{рр}}$ будут положительны, а слагаемые в формулах для расчета усилий, их содержащие - отрицательны. Действительно, в этих случаях тангенциальные составляющие сил тяжести ковша, породы в ковше и рукояти будут направлены в сторону забоя (или

места разгрузки), уменьшая тем самым активное усилие напора. При копании или разгрузке на высоте, большей высоты напорного вала величины $\gamma_{рк}$ и $\gamma_{рр}$ будут отрицательны, а содержащие их слагаемые - положительны, что также имеет физический смысл.

Предложенные аналитические зависимости, связывающие углы наклона подъемного каната и рукояти, расстояния от точек приложения действующих на рабочее оборудование сил до оси напорного вала экскаватора и расстояния от центров масс механизмов и конструкций до оси вращения поворотной платформы с параметрами забоя и основными конструктивными параметрами базовой машины позволяют производить эксплуатационные расчеты усилий и мощностей основных приводов карьерного экскаватора аналитически, исключив трудоемкую операцию построения и анализа масштабных схем рабочего оборудования карьерного экскаватора в забое и при разгрузке ковша.

С использованием данных зависимостей автором была разработана методика и на ее основе пакет компьютерных программ, позволяющих для заданного типа экскаватора, параметров забоя, свойств разрабатываемой горной массы, параметров транспортных средств определять кинематические, силовые, энергетические и эксплуатационные показатели работы экскаваторно-транспортного комплекса – скорости подъема, напора, поворота; усилия подъема и напора; средневзвешенные мощности двигателей механизмов подъема, напора, поворота и сетевого двигателя; время цикла экскавации; эксплуатационную производительность; удельные энергозатраты на экскавацию, транспортирование и суммарные, минимальную и максимальную массы противовеса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кувшинкин С.Ю. Влияние размеров рабочего оборудования карьерного экскаватора на его ресурс // Деп. – М.: ВИНИТИ, №1711-В991 от 31.05.1999. – 10 с.
2. Кувшинкин С.Ю. Определение рациональных конструктивных параметров рабочего оборудования карьерного экскаватора в системе экскаваторно-транспортного комплекса: дисс…. канд. техн. наук. – СПб, 1999. – 200 с.
3. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: МГГУ, 2007. – 680 с.
4. Справочник механика открытых работ. Экскавационно-транспортные машины цикличного действия. / М.И. Щадов [и др.]; под ред. М.И. Щадова, Р.Ю. Подэрни. – М.: Недра, 1989. – 374 с.
5. С.Ю. Кувшинкин, А.А. Беликов. Выбор рационального типа карьерного экскаватора для заданных условий эксплуатации в составе экскаваторно-автомобильного комплекса // Освоение минеральных ресур-

сов Севера: проблемы и решения: Труды 8-й международной научно-практической конференции. – Воркута.: ВГИ, 2010, С. 290-293.
6. С.Ю. Кувшинкин. Зависимость размеров рабочего оборудования экскаватора типа прямая лопата от условий эксплуатации // Полезные ископаемые России и их освоение: Тезисы докладов. – СПб.: РИЦ СПГГИ(ТУ), 1996 – С. 53.
7. С.Ю. Кувшинкин. Область использования сменного рабочего оборудования карьерных экскаваторов // Полезные ископаемые России и их освоение: Тезисы докладов. – СПб.: РИЦ СПГГИ(ТУ), 1998 – С. 114.
8. С.Ю. Кувшинкин. Определение геометрических параметров при расчете основных приводов карьерных экскаваторов // Записки горного института. – СПб.: РИЦ СПГГИ(ТУ), 2004. – Т. 157. – С. 37-40.
9. С.Ю. Кувшинкин. Применение сменного рабочего оборудования на карьерных экскаваторах // Сборник трудов молодых ученых СПГГИ(ТУ). – СПб.: РИЦ СПГГИ(ТУ), 1998. – Вып. 3. – С. 115-117.
10. С.Ю. Кувшинкин. Рациональные размеры рабочего оборудования карьерных лопат // Полезные ископаемые России и их освоение: Тезисы докладов. – СПб.: РИЦ СПГГИ(ТУ), 1997 – С. 75.

УДК 621.01/.03.: 621.86/.87

Е. В. Курапова, К. П. Манжула

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ КРАНОВ ПРОЛЕТНОГО ТИПА



Екатерина Вячеславовна Курапова, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия Тел.: (812) 552-84-01, E-mail: kurapovaev@gmail.com



Константин Павлович Манжула, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия Тел.: (812) 552-84-01, E-mail: manshula@mail.ru

Аннотация

В работе представлены зависимости изгибающих моментов для расчета напряжений в типовом технологическом цикле работы крана в периоды его неустановившихся движений для моделирования циклического нагружения крана пролетного типа.

*Ключевые слова:*Кран козловой, кран мостовой, момент грузовой, масса металлоконструкции, пролет, колея, база, подъем груза, передвижение крана.

E. V. Kurapova, K. P. Manzhula

AMENDMENT TO MODELING CYCLIC LOADING IN METAL FRAMEWORK PORTAL BRIDGE CRANE

Ekaterina V. Kurapova[1], e-mail: kurapovaev@gmail.com;
Prof. Konstantin P. Manzhula[1], E-mail: manshula@mail.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

The paper shows the bending moments for the calculation of stresses in a typical production cycle of the crane in the period his unsteady movements to simulate cycling of loading crane span type.

Key words: Portal bridge crane, overhead traveling crane, load moment, design mass, span, track centers, base, lifting (lowering) of load, travelling.

Краны пролетного типа (мостовые, козловые, перегружатели), как правило, работают по технологическим циклам, периодически повторяющимся в процессе эксплуатации, то есть подвержены блочному циклическому нагружению [1,2]. Расчет на сопротивление усталости для них строится по типовым технологическим циклам, которые учитывают расчетные комбинации и сочетания нагрузок при раздельной работе механизмов подъема груза, передвижения крана и тележки.

По этим комбинациям на металлическую конструкцию крана пролетного типа действуют (рис. 1) нагрузки от собственного веса моста G_M, тележки G_T, веса поднимаемого груза и грузозахвата $G_{гр+т}$. При разгоне или торможении механизма подъема к ним добавляется вертикальная сила инерция груза и грузозахвата $F_{иг}$, рассчитываемая как произведение $G_{гр}$ на коэффициент динамичности $К_д$, который определяется по результатам решения задач динамики разгона–торможения, как правило, для двух или трехмассовой моделей.

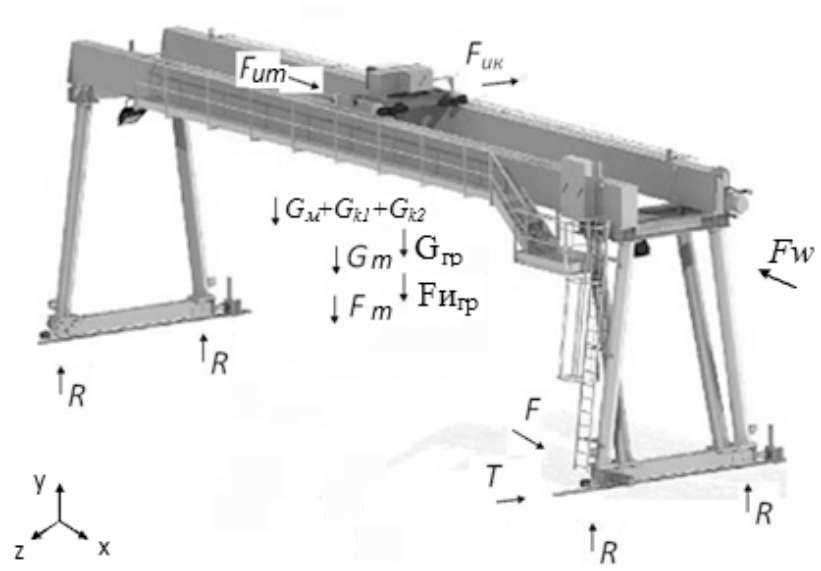


Рис. 1. Схема нагрузок, действующих на металлоконструкцию козлового крана

В горизонтальной плоскости в периоды неустановившихся движений крана и тележки возникают силы $F_{ик}$, $F_{ит}$, определяемые для равномерно ускоренного или равномерно замедленного движения. К ним может добавляться сила ветра *Fw* (СНиП 2.01.07-85 и СНиП 2.05.03-84) в случае работы крана на открытом воздухе. Кроме этого, при перекосе моста крана, вследствие неправильной укладки рельсов, деформаций моста или неправильной установки колес, возникают силы *T* вдоль кранового пути и силы

F поперек кранового пути, которые в зависимостях, приведенных ниже, пока не учитывались.

Из опыта эксплуатации определяются сечения металлоконструкции, в которых действуют наибольшие напряжения – середина пролета и место стыковки опор с пролетной частью, в которых рассчитываются номинальные напряжения с учетом динамики движений. Расчеты приходится выполнять многократно по каждому типовому технологическому циклу и каждой комбинации нагрузок, а так как расчетные схемы в большинстве случаев оказываются статически неопределимыми, то расчеты проводят численными методами в среде конечно-элементного моделирования, что является достаточно трудоемким. Поэтому предлагается найти инженерные зависимости для расчета номинальных напряжений в опасных сечениях металлоконструкций кранов вида, которые бы легко программировались и учитывали любое положение тележки с грузом в пролете крана. Применительно к мостовому крану такие зависимости были получены в работе [3]. В настоящей работе аналогичные зависимости получены для крана козлового типа. Массы элементов металлоконструкции рассматриваются как сосредоточенные, что вполне приемлемо при расчетах на усталость. Также рассматривается действие ветровой нагрузки. Положение тележки с грузом в пролете крана определяется переменной координатой *x*.

Схема металлоконструкции в направлении поперечном крановому пути (рис а, табл.1) представляет собой статически неопределимую раму, вследствие распора со стороны рельсов. Цифрами в окружностях показаны точки приложения сил или места соединения стержней. Изгибающие моменты в стержнях определяются методом сил (рис а, табл.1) и их эпюры по комбинации Iа показаны на рис. 2.

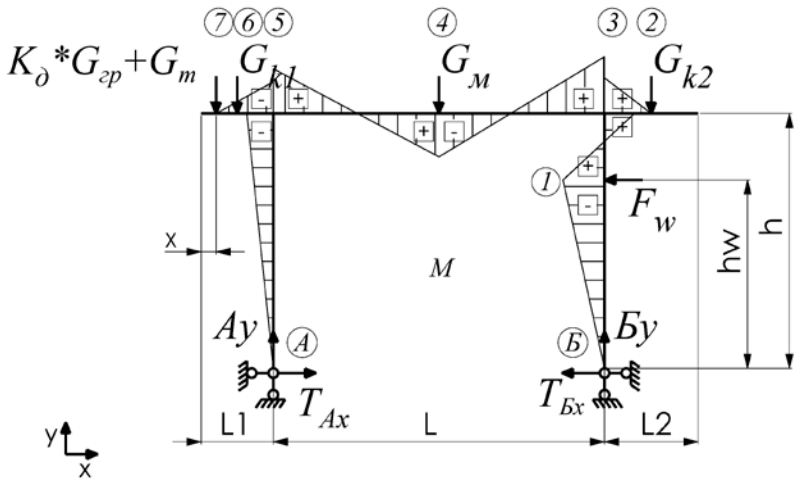
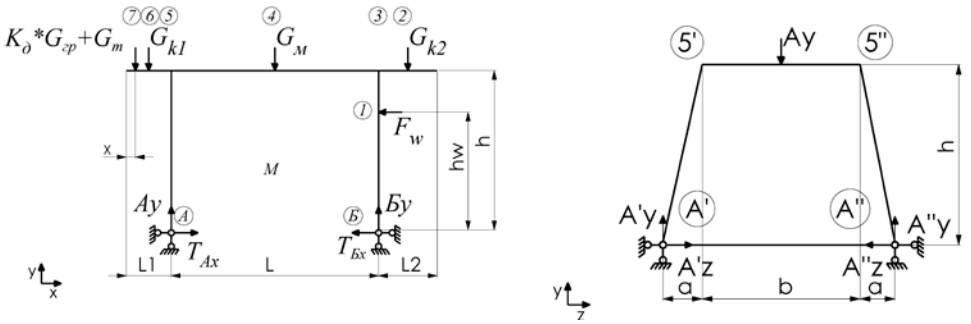
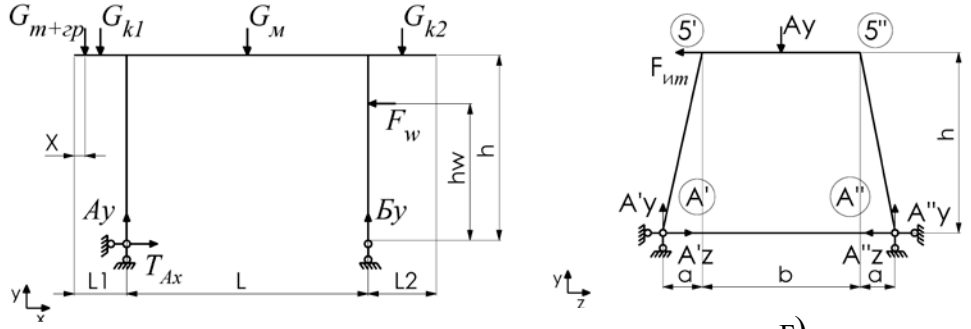
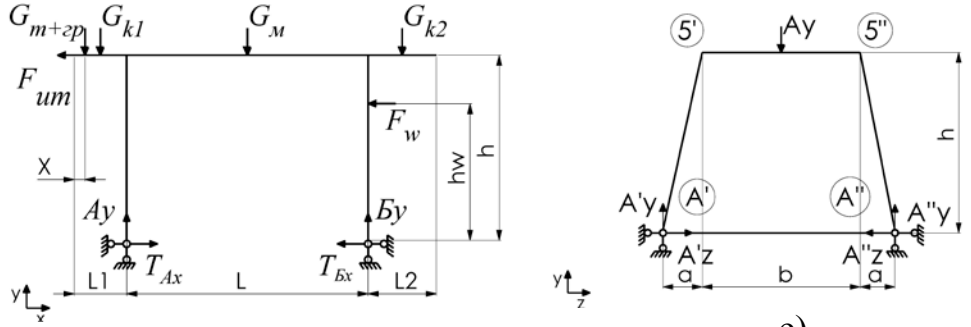


Рис. 2. Результирующая эпюра изгибающих моментов в металлоконструкции в направлении поперечном рельсовому пути

Таблица 1

Расчетные схемы конструкции при различных комбинаций нагрузок

Комбинации нагрузок	Схемы крана козлового типа
Ia Подъем-опускание груза	 а) б)
Ib Передвижение крана	 в) г)
Ic Передвижение тележки	 д) е)

Наибольшие моменты действуют в сечениях: по центру пролета, в месте примыкания консоли к ноге, в месте присоединения ног к пролетному строению. В этих сечениях располагаются сварные швы приварки диафрагм, фланцев, являющихся инициаторами появления усталостных трещин.

Изгибающий момент в т.5 со стороны левой консоли равен

$$Mz\ (x)_{опора} = -(K_{Д} \cdot G_{гр} + G_{m}) \cdot (l_1 - x_i) - \frac{1}{2} \cdot G_{k1} \cdot l_1. \qquad (1)$$

Изгибающий момент в т.4 по центру пролета выражается как

$$
\begin{aligned}
Mz(x)_{пролет} = {} & \frac{1}{\frac{2}{3}\cdot\frac{h^3}{E\cdot k\cdot J_2}+\frac{h^2\cdot l}{E\cdot J_2}}\cdot[h\cdot(-\frac{1}{3}\cdot\frac{h^3\cdot F_w}{E\cdot J_2}+\frac{1}{E\cdot k\cdot J_2}(\frac{1}{4}\cdot(F_w\cdot h+\frac{1}{2}\cdot G_{k1}\cdot l_1 \\
& +(K_Д\cdot G_{гр}+G_m)\cdot(l_1-x_i))\cdot l\cdot h+\frac{1}{4}\cdot(-\frac{1}{2}\cdot(K_Д\cdot G_{гр}+G_m)\cdot(l_1-x_i)+\frac{1}{4}\cdot G_м\cdot l \\
& -\frac{1}{4}\cdot G_{k1}\cdot l_1+\frac{1}{2}\cdot G_{k2}\cdot(\frac{l_2}{2}+l)-\frac{1}{2}\cdot F_w\cdot h_w-F_w\cdot(h-h_w)-\frac{1}{2}\cdot G_{k2}\cdot(\frac{l_2}{2}+\frac{l}{2}))\cdot l\cdot h) \\
& +\frac{1}{E\cdot k\cdot J_2}\cdot(\frac{1}{4}\cdot(\frac{1}{2}(K_Д\cdot G_{гр}+G_m)\cdot(l_1-x_i)-\frac{1}{4}\cdot G_м\cdot l+\frac{1}{4}\cdot G_{k1}\cdot l_1-\frac{1}{2}\cdot G_{k2}\cdot(\frac{l_2}{2}+l) \\
& +\frac{1}{2}\cdot F_w\cdot h_w+F_w\cdot(h-h_w)+G_{k2}\cdot(\frac{l_2}{2}+\frac{l}{2}))\cdot l\cdot h)+\frac{1}{4}\cdot(F_w\cdot(h-h_w)+\frac{1}{2}\cdot G_{k2}\cdot l_2)\cdot h\cdot l) \\
& +\frac{1}{2}\cdot\frac{k\cdot J_2\cdot F_w\cdot(h-h_w)^2\cdot(\frac{2}{3}\cdot h+\frac{1}{3}\cdot h_w)}{E})]+\frac{1}{2}\cdot(K_Д\cdot G_{гр}+G_m)\cdot(l_1-x_i)+\frac{1}{4}\cdot G_{k1}\cdot l_1 \\
& -\frac{1}{2}\cdot G_{k2}\cdot(\frac{l_2}{2}+l)+\frac{1}{2}\cdot F_w\cdot h_w+F_w\cdot(h-h_w)+G_{k2}\cdot(\frac{l_2}{2}+\frac{l}{2})
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

Здесь X_i - координата тележки; l - пролет крана; l_1, l_2 - длины консолей; h - высота крана; h_w - координата приложения ветровой нагрузки; $K_д$ - динамический коэффициент; $G_м$, G_m, $G_г$, G_{k1}, G_{k2} - вес металлоконструкции моста, тележки, груза и грузозахвата соответственно, консоли; F_w - ветровая нагрузка; момент инерции сечения пролета J_1 принят равным $J_1 = k\cdot J_2$, где J_2 - момент инерции сечения ноги. Центр тяжести консоли принят равным половине длины консоли.

В направлении рельсового пути схема металлоконструкции внутренне статически неопределима (рис. б, табл. 1). Результирующая эпюра изгибающих моментов по комбинации Ia для заданной системы представлена рис. 3.

Обозначим

$$
\begin{aligned}
D = {} & -K_Д\cdot G_{гр}-G_m-G_м-G_{k1}-G_{k2} \\
& -\frac{(K_Д\cdot G_{гр}+G_m)\cdot(l_1-x_i)-\frac{1}{2}\cdot G_м\cdot l+\frac{1}{2}\cdot G_{k1}\cdot l_1-G_{k2}\cdot(\frac{l_2}{2}+l)+F_w\cdot h_w\cdot}{l}
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

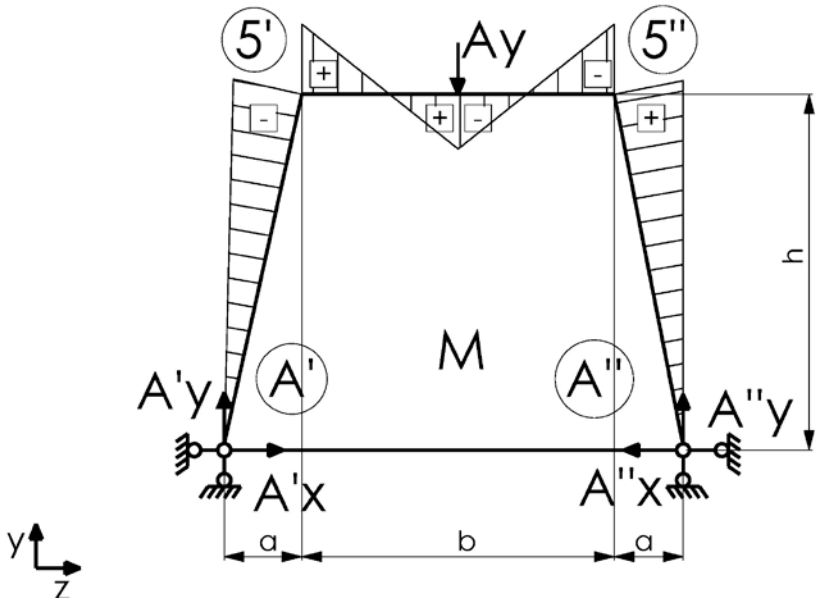


Рис. 3. Результирующая эпюра изгибающих моментов в металлоконструкции в направлении рельсового пути

Момент в стойке (точка 5) ноги рамы (рис. 3)

$$M_x(x)_{опора} = -\frac{1}{\frac{2}{3}\cdot\frac{\sqrt{a^2+h^2}\cdot h^2}{E\cdot k\cdot J_2}+\frac{h^2\cdot b}{E\cdot J_2}}[h\cdot(\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{E\cdot J_2}\cdot[\sqrt{a^2+h^2}\cdot h\cdot(-\frac{D\cdot(\frac{b}{2}+a)\cdot(a+b)}{b+2\cdot a}$$

$$+D\cdot(\frac{b}{2}+a)]-\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{E\cdot k\cdot J_2}\cdot\frac{\sqrt{a^2+h^2}\cdot h\cdot D\cdot(\frac{b}{2}+a)^2}{(b+2\cdot a)}+\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{E\cdot J_2}\cdot\frac{\sqrt{a^2+h^2}\cdot h\cdot D\cdot(\frac{b}{2}+a)\cdot a}{(b+2\cdot a)}]$$

$$-\frac{D\cdot(\frac{b}{2}+a)\cdot(a+b)}{b+2\cdot a}+D\cdot(\frac{b}{2}+a) \qquad (4)$$

.

Момент в ригеле в сечении действия силы Ay (рис.3) выражается зависимостью

$$M_x(x)_{ригель} = -\frac{1}{\frac{2}{3}\cdot\frac{\sqrt{a^2+h^2}\cdot h^2}{E\cdot k\cdot J_2}+\frac{h^2\cdot b}{E\cdot J_2}}[h\cdot(\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{E\cdot J_2}\cdot[\sqrt{a^2+h^2}\cdot h\cdot(-\frac{D\cdot(\frac{b}{2}+a)\cdot(a+b)}{b+2\cdot a}$$

$$+D\cdot(\frac{b}{2}+a)]-\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{E\cdot k\cdot J_2}\cdot\frac{\sqrt{a^2+h^2}\cdot h\cdot D\cdot(\frac{b}{2}+a)^2}{(b+2\cdot a)}+\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{E\cdot J_2}\cdot\frac{\sqrt{a^2+h^2}\cdot h\cdot D\cdot(\frac{b}{2}+a)\cdot a}{(b+2\cdot a)}]$$

$$+\frac{D\cdot(\frac{b}{2}+a)^2}{b+2\cdot a}) \qquad (5)$$

Аналогичные зависимости 1, 2, 4 и 5 получены для комбинаций нагрузок Ib и Ic, которые в данной статье не приводятся.

Сформировав типовые технологические циклы (ТТЦ) работы крана можно спрогнозировать историю нагружения металлоконструкции крана и по полученным моментам рассчитать номинальные напряжения в ее опасных сечениях.

Так в опасных сечениях металлоконструкции моста номинальные напряжения по комбинации Ia при любом положении тележки с грузом определятся как $\sigma_z(x)_{пролет} = \frac{Mz(x)_{пролет}}{W_z}$.

Для стойки ноги наибольшие номинальные напряжения (т. 5) определяются алгебраическим суммированием напряжений в двух плоскостях (рис. 2 и 3) и при любом положении тележки вдоль оси x равны

$$\sigma(x)_{опора} = \sigma_z(x)_{опора} + \sigma_x(x)_{опора},$$

где $\sigma_z(x)_{опора} = \frac{M_z(x)_{опора}}{W_z}$,

$$\sigma_x(x)_{опора} = \frac{M_x(x)_{опора}}{W_x}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манжула, К.П. Прочность и долговечность конструкций при переменных нагрузках: учеб. пособие. / К.П. Манжула, С.В. Петинов. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 76с..
2. Соколов С.А. Строительная механика и металлические конструкции машин: Учебник с грифом УМО.- СПб.: Политехника, 2011.- 450с.
3. Курапова Е.В., Манжула К.П. К методике моделирования циклического нагружения кранов мостового типа // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С.438-444.

УДК 621.873.12

В. А. Лебедев

РАСЧЕТ ПЕРЕКОСА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ КОЗЛОВОГО КРАНА



Владимир Александрович Лебедев, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: +7-911-715-56-66,
E-mail: vladimir_aleksandrovich_lebedev@mail.ru.

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос образования перекоса в металлической конструкции козлового крана, выполнены расчеты перекоса по существующим методикам в зависимости от положения талей с грузом, по результатам расчетов сформулированы выводы.

Ключевые слова: козловой кран, таль, перекос, боковая сила, сила перекоса.

V.A. Lebedev

CALCULATION OF SKEWING METAL STRUCTURE OF GANTRY CRANE

Vladimir A. Lebedev, e-mail: vladimir_aleksandrovich_lebedev@mail.ru,
[1]St. Petersburg Polytechnical University, St-Petersburg, Russia

Abstract

In the article the question of skewing in of metal construction gantry crane, were made calculations skewing by existing techniques, depending on the position of the hoist with the load, conclusions were drawn based on the results of calculations.

Key words: gantry crane, hoist, skewing, lateral force, force of skewing.

При проектировании и эксплуатации кранов мостового типа существует проблема долговечности металлоконструкций, которая связана с развитием усталостного повреждения металла в результате действия переменных во времени напряжений [1]. Наиболее подверженными усталостным повреждениям являются узлы примыкания пролетных и концевых балок для мостовых кранов, или узлы соединения пролетных балок и опорных стоек для козловых кранов. В значительной степени нагруженность указанных узлов связана с перекосом конструкции крана

при эксплуатации, то есть забеганием концевых балок относительно друг друга. В настоящее время существуют методики по определению перекосов, некоторые из которых имеют экспериментальные подтверждения. Основными недостатками существующих методик является то, что:

1) методики основываются на исследованиях кранов с релейно-контакторной системой управления механизма передвижения, однако, в настоящее время наиболее распространены приводы с частотной системой управления;
2) методики дают оценку максимальных параметров, а для анализа долговечности конструкций необходимы оценки цикличности перекосов.

По характеру управления приводами (т.е. разгон и торможение) релейно-контакторная и частотная системы управления имеют ряд существенных различий. При установившемся движении крана релейно-контакторная система управления имеет сходство с частотной системой управления при групповой схеме подключения приводов. Этот факт является предпосылкой для исследования существующих методик по определению перекоса при установившемся движении крана с целью определения параметров оказывающих влияние на величину перекоса.

Для исследования существующих методик проведем расчет перекоса металлической конструкции козлового крана при установившемся движении в зависимости от положения талей с грузом (см. рис. 1). Козловой кран имеет следующие параметры: $m_{crane} = 4030$кг - масса козлового крана; $m_{hoist} = 110$кг - масса одной тали; $Q = 2000$кг - грузоподъемность одной тали; $V_{crane} = 0{,}17$м/с - скорость передвижения козлового крана; $l_{span} = 12000$мм - пролет козлового крана; $b = 4763$мм - база козлового крана; $D_{wheel} = 250$мм - диаметр поверхности катания ходового колеса; $d_{stub_axle} = 70$мм - диаметр цапфы вала ходового колеса; $\Delta_{crane} = 19$мм - зазор между ребордами колеса и боковыми поверхностями рельса; $b_h = 51$мм - ширина головки рельса Р24 ГОСТ 4121-96 [2].

Согласно методике [3] расчет силы перекоса при установившемся движении определяется по формуле (см. рис. 1):

$$F_{skewing} = 0{,}7 \cdot W_{AB} - 0{,}5 \cdot W_{CD} \quad (1)$$

где W_{AB} - приведенное суммарное сопротивление к жестким опорам;
W_{CD} - приведенное суммарное сопротивление к гибким опорам (см. рис. 1).
Основное влияние на сопротивление передвижению крана оказывает трение, поэтому пренебрегая сопротивлением от силы ветра, уклона и т.п. определим приведенное суммарное сопротивление к опорам как:

$$W = \frac{N}{D_{wheel}} \cdot (2 \cdot f + f_{shaft} \cdot d_{stub_axle}) \cdot k_{flange} \quad (2)$$

где N - суммарная вертикальная нагрузка, действующая на колеса опор (гибких или жестких); $f = 0{,}04$ - коэффициент трения качения; $f_{shaft} = 0{,}015$ - коэффициент трения в опоре вала колеса; $k_{flange} = 1{,}5$ - коэффициент, учитывающий сопротивление трения реборд ходовых колес и торцов ступиц колеса.

Для определения суммарных вертикальных нагрузок, действующих на колеса опор, составим систему уравнений равновесия (см. рис. 1):

$$\begin{cases} R_{AB} - 2 \cdot g \cdot (m_{hoist} + Q) - g \cdot (m_{crane} - 2 \cdot m_{hoist}) + \\ + R_{CD} = 0 \\ - 2 \cdot g \cdot (m_{hoist} + Q) \cdot x_{hoist} - g \cdot (m_{crane} - 2 \cdot m_{hoist}) \cdot l_C + \\ + R_{CD} \cdot l_{span} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где x_{hoist} - положение центра тяжести талей с грузом относительно жестких опор ($1000\text{мм} \le x_{hoist} \le 11000\text{мм}$); $l_C = 6000\text{мм}$ - положение центра тяжести крана без талей и грузов.
Из формул (1) - (3) был получен график зависимости силы перекоса от положения талей с грузами (см. рис. 2).

Согласно методике [4] боковая сила, действующая на колесо, вычисляется как:

$$H_{lateral} = \lambda \cdot N_{wheel} \quad (4)$$

где N_{wheel} - вертикальная нагрузка на колесо; $\lambda = 0{,}068$ - коэффициент зависимости осевой силы на ходовое колесо при $\frac{l_{span}}{b} = 2{,}5$.

Предположим, что суммарная вертикальная нагрузка опор одной стороны крана распределяется равномерно между колесами (см. рис. 1). Тогда вертикальную нагрузку на колесо определим как:

$$N_{wheel} = \frac{R_{AB}}{2} \quad (5)$$

Сила перекоса для козлового крана с одной жесткой опорой найдем как [3]:

$$F_{skewing} = \frac{b}{l_{span}} \cdot H_{lateral} \quad (6)$$

Из формул (4) - (6) был получен график зависимости силы перекоса от положения талей с грузами (см. рис. 3).

Согласно методике [5] боковая сила, действующая на колесо, определяется по зависимости:

$$H_{later} = v \cdot f \cdot m \cdot g \quad (7)$$

где $m \cdot g = 38{,}3\text{кН}$ - сила тяжести козлового крана; f - коэффициент трения качения колеса; v - коэффициент учитывающий возможное поперечное смещение колеса.

Коэффициент трения качения колеса определяется по формуле:

$$f = 0{,}3 \cdot [1 - e^{(-250\alpha)}] \quad (8)$$

где α - угол перекоса в радианах. Угол перекоса определяется по формуле:

$$\alpha = \alpha_g + \alpha_w + \alpha_t \quad (9)$$

где α_g - перекос в результате зазоров между ребордами колеса и боковыми поверхностями рельса; α_w - перекос в результате износа; $\alpha_t = 0{,}001\text{рад}$ - перекос вызванный неточностью изготовления и монтажа.

Перекос в результате зазоров между ребордами колеса и боковыми поверхностями рельса определяется по формуле:

$$\alpha_g = \frac{\Delta_{crane}}{b} \quad (10)$$

Перекос в результате износа вычисляется как

$$\alpha_w = 0{,}1 \cdot \frac{b_h}{b} \quad (11)$$

Коэффициент учитывающий возможное поперечное смещения колеса, для случая раздельного привода и фиксированных в поперечном направлении колес определяется по формуле:

$$v = 1 - \frac{d_1 + d_2}{n \cdot h} \quad (12)$$

где $d_1 = 0$ - расстояние от 1-ой колесной пары до точки контакта реборды и рельса; $d_2 = 4763$ - расстояние от 2-ой колесной пары до точки контакта реборды и рельса; $n = 4$ - количество колес козлового крана; h - расстояние между мгновенным полюсом поворота и плоскостью симметрии рельса.

Расстояние между мгновенным полюсом поворота и направляющим устройством (ребордой) для случая раздельного привода и фиксированных в поперечном направлении колес определяется по формуле:

$$h = \frac{p \cdot \mu \cdot \mu' \cdot l_{span}^2 + d_1^2 + d_2^2}{d_1 + d_2} \qquad (13)$$

где $p = 2$ - количество пар колес; $\mu = x/l$, x – координата положения центра масс крана с грузом; $\mu' = 1 - \mu$.

Из формул (6)-(13) был получен график зависимости силы перекоса от положения талей с грузами (см. рис. 2).

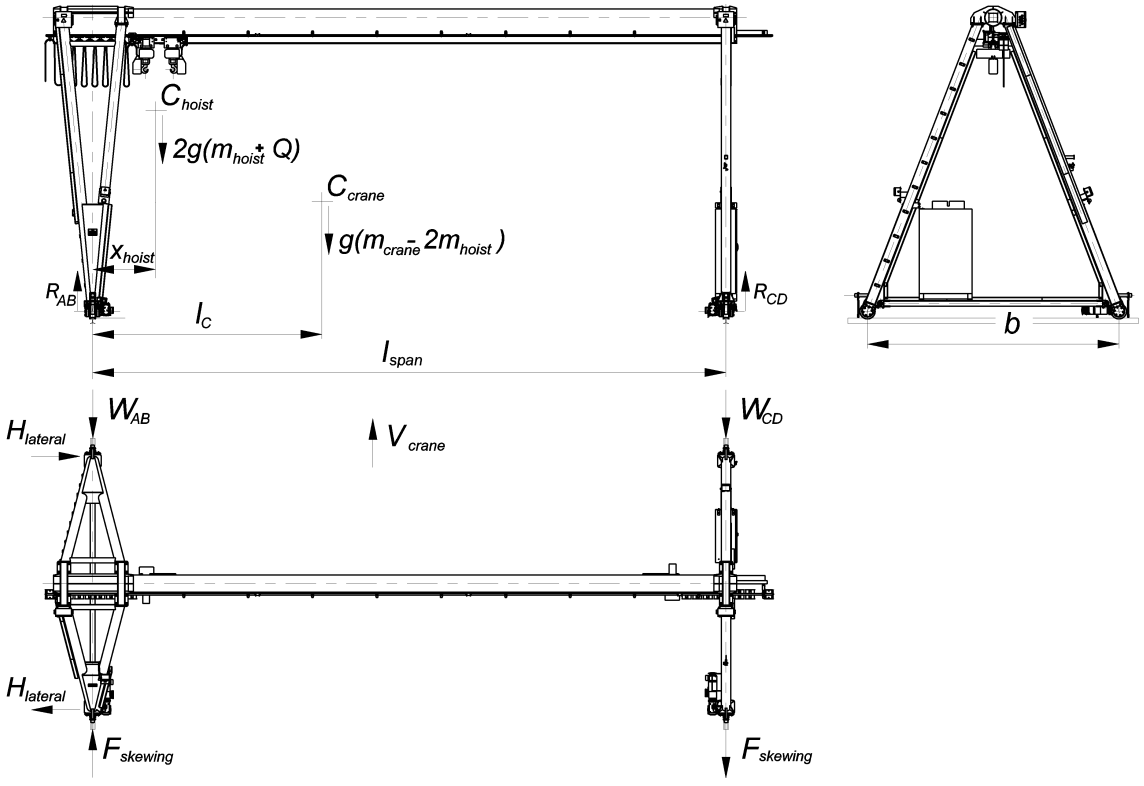


Рис. 1. Общий вид козлового крана с расчетной схемой нагрузок при перекосе.

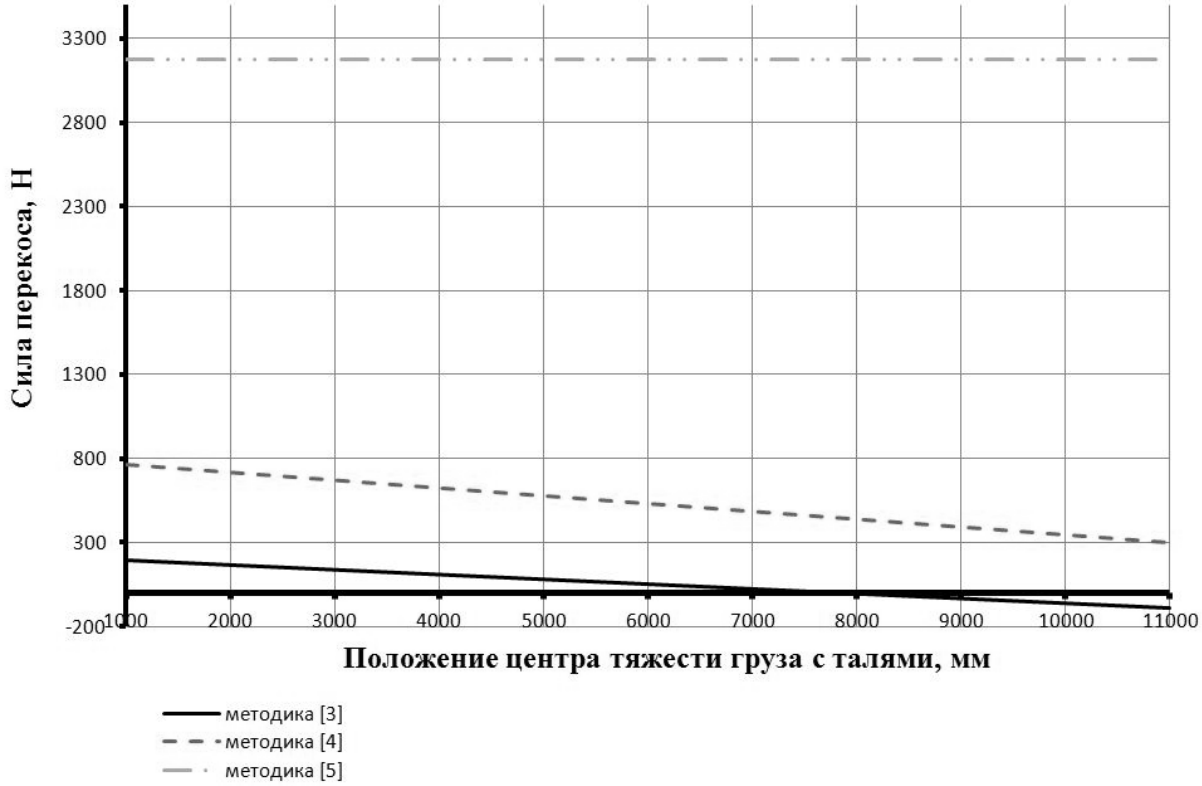


Рис. 2. График зависимости силы перекоса от положения талей с грузами.

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

- результаты расчетов по разным методикам существенно различаются, что свидетельствует о том, что перекос зависит от многих факторов, которые по разному учитываются в методиках;
- согласно расчету по методикам [3] и [4] изменение положения талей с грузом оказывает влияние на значение, а для методики [3] и направления силы перекоса;
- методика [5] дает значительно большие значения перекоса и не учитывает его зависимость от положения талей с грузом.

Таким образом, проблема перекосов пока не имеет надежного инженерного решения. Для анализа влияния перекоса на долговечность металлоконструкции крана на стадии проектирования необходимо разработать методику, которая позволит определять параметры перекоса в зависимости от эксплуатационных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. – СПб.: Политехника, 2005. – 423 с.
2. ГОСТ 4121-96. Рельсы крановые. Технические условия.

3. СТО 24.09-5821-01-93 Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций. Стандарт ВНИИПТМАШ-ПОДЪЕМТРАНСТЕХНИКА, 1993, 135 с.
4. Federation Europeenne de la manutention. Section I: FEM 1.001. Rules for the design of hoisting appliances. 3RD Edition, 10.1998.
5. EN 13001-2:2004 (E) Crane safety - General design - Part 2: Load effects

УДК 351.777.8

В.П. Ложечко, М.С. Крицын

О МЕТОДАХ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ИЗ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ



Виктор Петрович Ложечко, д.т.н., профессор
Депутат, председатель комиссии по экологии и природопользованию Законодательного Собрания Санкт-Петербурга
Исаакиевская пл., д.6, Санкт-Петербург, 190107, Россия.
Тел.: (812) 998-55-92, E-mail: vplozhechko@mail.ru.



Максим Сергеевич Крицын, студент магистр
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911) 849-24-23, E-mail: kritsyn_ms@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены методы производства альтернативного твердого топлива из твердых бытовых отходов. Представлен морфологический состав твердых бытовых отходов в Санкт-Петербурге. Описаны технологические этапы производства топлива RDF. Представлены характеристики и особенности топлива, показана область его применения. Обоснована целесообразность использования RDF.

Ключевые слова: Альтернативное топливо, RDF, переработка ТБО.

V.P. Lozhechko, M.S. Kritsyn

ON THE PRODUCTION METHODS OF THE ALTERNATIVE REFUSE DERIVED FUEL

Dr. prof. Victor P. Lozhechko, Member of Legislative Assembly of St. Petersburg, Russia, e-mail: vplozhechko@mail.ru;
Maksim S. Kritsyn, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia
e-mail: kritsyn_ms@mail.ru.

Abstract

The article discusses production methods of the alternative refuse derived fuel. The morphological composition of solid domestic waste in St. Petersburg is given. The engineering production line of RDF was described. The characteristics and peculiar properties of the fuel were presented. The area of its application was shown. The practicability of using RDF was proved.

Key words: alternative fuel, RDF, solid-waste recycling

Возникшее недавно осознание кризисной ситуации с отходами, с которой столкнулось наше общество, привело к тому, что обращение с отходами из второстепенной проблемы превратилось в центральный вопрос дальнейшей жизнедеятельности. Сложившаяся система имеет выраженную регрессивную тенденцию, ведь каждый год в Российской Федерации образуется более 40 млн. тонн твердых бытовых отходов, которые захораниваются, в основном, на необорудованных должным образом полигонах (свалках), а переработке без вреда окружающей среде подвергается лишь малая часть (3-5%). Всего в России накоплено около 90 млрд. тонн различных отходов, а площадь только санкционированных свалок составляет более 2,5 тыс. км^2.

Наиболее остро проблема обращения с отходами ощущается в крупных городах, таких как Санкт-Петербург. Анализ существующих объемов образования твердых бытовых отходов (ТБО) позволяет утверждать, что в Санкт-Петербурге ожидается образование 1,8 млн. тонн ТБО к 2015 году и 2 млн. тонн ТБО к 2020 году [1].

В настоящее время только небольшая часть ТБО, образуемых в Санкт-Петербурге, перерабатывается на специализированных мусороперерабатывающих заводах (до 15%), основная же часть ТБО размещается на полигонах без переработки. Примерный морфологический состав ТБО, образующихся в Санкт-Петербурге, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Морфологический состав твердых бытовых отходов в Санкт-Петербурге

Тип отходов	**Относительная доля в общем составе, %**	**Тип отходов**	**Относительная доля в общем составе, %**
Органические отходы	27,4	ПЭ пленки	7,4
Бумага и картон	21,5	Другие пластики	2,5
Цветные металлы	3,8	Текстиль, кожа, резина	4,3
Черные металлы	0,8	Дерево	2,5
Стекло	8,9	ПВХ	0,1
ПЭТ	3,4	Инертные материалы	12,8
Пластик высокого давления	1,0	Прочие материалы	2,8
		ИТОГО	100,0

Согласно Федеральному закону № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» всю массу отходов следует разделять на две большие груп-

пы: отходы потребления и отходы производства. Под первой группой отходов понимаются предметы, потерявшие полностью или частично свои потребительские или функциональные качества в процессе физического или морального износа и жизнедеятельности человека. Они, в свою очередь, могут быть образованы в промышленности и в быту. Вторая группа - отходы производства, представляют собой отходы, образованные в результате деятельности предприятия или получаемые на его технологических этапах. Все отходы для определения возможного метода утилизации классифицируются по степеням опасности. В данный момент в России в соответствии с приказом Министерства природных ресурсов РФ от 15.06.2001 года № 511 установлено 5 классов опасности отходов:

1 класс – чрезвычайно опасные;

2 класс – высокоопасные;

3 класс – умеренно опасные;

4 класс – малоопасные;

5 класс – практически неопасные.

Процесс обращения с ТБО включает в себя несколько технологических этапов: сбор отходов, транспортировка их к месту переработки, переработка и захоронение оставшихся компонентов, не подлежащих дальнейшему использованию. Организация такой системы требует немалых капитальных вложений и четкого структурного подхода.

С точки зрения ресурсосбережения приоритетным направлением в сфере обращения с отходами является переработка отходов с целью их вторичного использования, поэтому именно на методах переработки ТБО хотелось бы остановиться подробнее.

По своей конечной цели методы переработки подразделяются на: утилизационные – это методы переработки отходов, направленные на получение и последующее использование вторичных ресурсов сырья и ликвидационные – их основными задачами является сохранение должной санитарно-экологической обстановки и полного или частичного уничтожения отходов. В настоящее время известно немало способов переработки отходов, но наибольшую популярность получили следующие методы: складирование отходов на территории полигонов; сжигание на специализированных предприятиях; аэробное биотермическое компостирование и пиролиз. Эти методы, конечно, являются базовыми и имеют ряд своих плюсов и достоинств. Однако и отрицательных характеристик у этих методов хватает, особенно наглядно они проявляются при неверном соблюдении технологических режимов и экологических стандартов в процессе обращения с отходами, что в нашей стране, к сожалению, является частым случаем. В Российской Федерации более всего распространено складирование отходов на полигонах из-за своей дешевизны и простоты реализации. К сожалению, этот путь влечет за собой довольно-таки серьезные и опасные последствия, ведь территории, отведенные под складирование отходов, не

могут быть безграничными, и в будущем будут охватывать все новые и новые площади, нанося катастрофический вред окружающей среде. К тому же многие полигоны больше похожи на свалки мусора, не соответствуют санитарным и природоохранным требованиям, предъявляемым к полигонному захоронению ТБО.

В странах Евросоюза наибольшую популярность приобрело строительство мусороперерабатывающих предприятий. Задачи, конечные цели, направление деятельности и виды отходов, перерабатываемые на этих предприятиях, могут различаться и иметь свои особенности. Но объединяет их то, что главным в их деятельность является создание производства, в котором большая часть отходов (а в будущем – практически вся) после переработки будет находить свое применение в различных областях промышленности и жизнедеятельности человека.

Одним из современных и наиболее перспективных методов переработки отходов, на наш взгляд, является производство из ТБО альтернативного твердого топлива RDF (Refuse Derived Fuel). Этот метод переработки ТБО появился в середине прошлого века и пользуется популярностью в технологически развитых странах. RDF – топливо, полученное путем измельчения, сепарации и обезвоживания твердых бытовых отходов, с применением технологий преобразования отходов. В ходе этих преобразований отбирается горючая, высококалорийная фракция размером 20–60 мм. В зависимости от требований предприятий, где применяется этот вид альтернативного топлива, оно может использоваться в измельченном состоянии или в виде спрессованных брикетов. Топливо RDF используется в качестве частичного замещения основного вида топлива, например, для сжигания в цементных печах и энергетических установках в теплоэлектроцентралях, а также на заводах по изготовлению строительных материалов. Высокие температуры, используемые в этих производствах, дают возможность сжигать этот вид топлива, не причиняя серьезного ущерба окружающей среде. Экологический и энергетический фактор применения топлива, изготовленного из отходов, налицо. Запасы сырья для производства такого топлива неистощимы, постоянно пополняются и в России пока остаются практически невостребованными.

Технология производства альтернативного топлива RDF в разных регионах может иметь различия, это зависит от многих факторов: разный морфологический состав отходов, дальнейший способ использования топлива, экологические особенности, разный технологический подход к операциям преобразования ТБО и др. Например, отличие технологии США от немецкой технологии в том, что в Германии топливные брикеты прессуются настолько плотно, что между волокнами практически не остается воздушных пузырей. Тепловые энергетические брикеты производства США формируются за счёт уникальной технологии, когда между волокнами сохраняются воздушные пузырьки, что обеспечивает высокую теплоотдачу

при их использовании в качестве топлива [2]. Но, стоит сказать, что базовые этапы, а именно: сепарация, измельчение, сушка и брикетирование у всех типов производств RDF имеются, и являются главными и необходимыми.

Рассмотрим подробнее каждый такой технологический этап и выделим его характерные особенности. **Сепарация** (сортировка) является одним из самых главных этапов производства альтернативного топлива. Ее задача распознать и удалить из общей массы ТБО неперерабатываемые компоненты: камни, стекло, песок, керамика, а также извлечь элементы, которые при сжигании своими продуктами горения оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду: металлы, изделия на основе поливинилхлорида (ПВХ), автомобильные запчасти и комплектующие, лампы, хлорсодержащие вещества и т.д.

Как мы видим, здесь в силу вступает самый важный и ключевой фактор – экологический. Он и является базовым критерием производства RDF, т. к. при сжигании топлива в атмосферу могут попадать различные отравляющие вещества и токсины, такие как диоксины, фураны, фосген, цианиды и др. Диоксины – бесцветные кристаллы с температурой плавления 320-325 °С. Диоксин и близкие к нему по строению соединения - источники загрязнения окружающей среды. Химически они очень инертны, способны накапливаться в организме, высокотоксичны. Цианиды – соли синильной кислоты HCN, чрезвычайно ядовиты [3]. Присутствие в топливе RDF некоторых веществ остается под вопросом и требует тщательного химического анализа. Например, ДСП, ДВП, фанера содержат большие количества формальдегидных смол, которые при горении выделяют цианиды и формальдегиды; предметы, окрашенные масляной краской, содержащей свинец; пищевые отходы, при гниении которых могут образовываться опасные вещества. Экологическая безопасность, отсутствие компонентов, загрязняющих атмосферу, являются приоритетными факторами при создании топлива RDF, это и характеризует этап сортировки как наиболее важный, требующий компетентного и ответственного подхода. Не стоит забывать, что на этапе отбора инертных и опасных компонентов в топливе должны оставаться горючие фракции, обладающие высокой калорийностью и теплотворной способностью. Такими являются: бумага, дерево, текстиль, пленка, ветошь, резина. Часть сырья после сортировки (металлы, стекло) может идти на его вторичную переработку и дальнейшее использование.

Особую группу составляют автомобильные покрышки, они нередко выступают как самостоятельное твердое топливо, пользуясь немалой популярностью в цементной промышленности. Однако, в связи с ужесточением законодательства в области защиты окружающей среды, соблюдение экологической безопасности при сжигании покрышек влечет за собой появление новых более серьезных средств очистки газов, образующихся при

сжигании шин. Поэтому использование этого вида топлива, требующего установки дорогостоящих систем очистки газов, ставит под вопрос его экономическую целесообразность.

В процессе сортировки может использоваться несколько видов оборудования: оптический сепаратор, магнитный сепаратор, барабанный грохот, вибрационный грохот, воздушный классификатор и т.д. Из всего оборудования, применяемого в процессе производства топлива RDF, эти виды оборудования являются наиболее дорогостоящими и технически сложными.

Следующий этап производства топлива – это его **измельчение** (дробление) до необходимого размера фракции. Зачастую технологически целесообразно проводить этот процесс в несколько этапов. Предварительное измельчение может предшествовать этапу сепарации. Иногда на первоначальном этапе измельчения ТБО практикуется применение устройств по разрыванию пакетов, это способствует упрощению дальнейшего технологического процесса и уменьшению размеров крупногабаритных отходов.

Наиболее важным моментом здесь является подбор оборудования, а точнее его технических характеристик, удовлетворяющих специфике данного производства. Выбирать здесь стоит из большого разнообразия валковых дробилок и различных конструкций шредеров. Основными требованиями и критериями являются: высокая производительность (на таких предприятиях обычно перерабатываются большие объемы ТБО); способность техники работать с разными видами сырья, в виду многообразного состава отходов; затраты на приобретение оборудования; простота в техническом обслуживании и, безусловно, качество самого оборудования. Большое внимание стоит уделять получаемым при дроблении геометрическим формам и размерам фракции, ведь в дальнейшем это может сыграть свою роль во время сушки топлива и при изготовлении топливных брикетов. Если этап дробления проходит в две стадии, то на каждой получается свой характерный размер сырья, который определяется особенностями состава и вида отходов. Количество стадий дробления зависит от технологических характеристик производства и процессов сепарации. В процессе заключительного измельчения формируется однородная масса сырья с примерно одинаковыми размерами фракции. Далее идет измерение и оценка показателей влажности топлива.

Очередным технологическим этапом производства топлива RDF, прошедшего процессы сепарации и измельчения, является **сушка**. Этот этап характеризуется большими потерями ТБО влаги, а соответственно, повышением теплотворных и энергетических показателей. Процесс сушки влияет на качество и калорийность топлива, способствуя увеличению его стоимости и востребованности на рынке. Начальное содержание влаги в сырье обычно составляет 20 – 30 %, но необходимая для топлива высокого качества влажность не должна превышать 9-11 %. При подборе сушильного оборудования надо учитывать, что такие машины часто характеризуют-

ся высоким потреблением энергии. Необходимо обратить внимание на вид энергопотребления и энергоносителя этой установки. Применение RDF в виде основного топлива для агрегата сушки стоит под большим вопросом. Это оказывает отрицательное экологическое влияние на окружающую среду, так как действующие там системы очистки газов не способны предотвращать выброс вредных продуктов горения в атмосферу. Действующих значений температур тоже недостаточно для борьбы с опасными компонентами.

После сушки топливо уже может поставляться для дальнейшего использования, но чаще окончательным этапом производства RDF является **изготовление топливных брикетов**. Они получаются в процессе прессования под высоким давлением на механических прессах. Подбор такого оборудования часто вызывает большие сложности. В виду разнообразного, сложного и неоднородного состава топлива многие действующие конструкции механических, а, тем более, гидравлических прессов выходят из строя или появляются проблемы при их эксплуатации. В идеальном случае оборудование должно изготавливаться непосредственно для работы с конкретным составом отходов. Возможно возникновение трудностей при поиске связующего элемента в общей массе топлива, которым чаще всего выступают различные полимеры и пластики. Иногда, в отсутствии таких компонентов, брикет просто напросто разваливается. В некоторых случаях практикуется специально обогащать топливо элементами, которые увеличивают липкость и связность компонентов при формировании топливных брикетов. При этом не стоит забывать о том, какое экологическое воздействие будет оказываться на окружающую среду при сгорании любых добавляемых в состав топлива веществ.

В России, на данный момент, нет предприятий, производящих альтернативное твердое топливо RDF, в отличие от Европы и США, где это направление развивается стремительными темпами. На некоторых предприятиях замена природного топлива этим видом топлива доходит до 60%. Нет сомнения, что этот метод утилизации ТБО должен появиться и у нас, возможно это случится уже совсем скоро. Однако тут придется столкнуться с рядом проблем в отличии от Европейских стран. Главную сложность составит отсутствие у нас раздельного сбора ТБО, в то время как во многих развитых странах во дворах стоят контейнеры для разных типов отходов и вероятность попадания в общую массу отходов опасных элементов мала. В нашем случае это влечет за собой необходимость более тщательного подхода к вопросу сепарации. Ведь экологическая безопасность превыше всего! Изучив опыт Европейских стран в этом вопросе, и взяв во внимание особенности сбора и состава ТБО в нашем регионе, авторы предлагают следующую технологическую схему производства топлива RDF (рис. 1).



Рис. 1. Технологическая схема производства альтернативного твёрдого топлива RDF.

1. Сбор, транспортировка к месту переработки и хранение ТБО.

2. Предварительное измельчение материала до размера 100-150 мм.

3. Сепарация (1 этап). Отделение от массы ТБО непригодных (недопустимых) для сжигания включений (металлы, стекло, песок, камень, хлорсодержащие вещества, керамик и т.д.). Применение магнитных, баллистических и пневматических сепараторов. Сепарация цветных металлов.

4. Измельчение материала до размера 20-50 мм.

5. Сепарация (2 этап). Процесс сепарации высокой степени с применением оптических сепараторов.

6. Сушка топлива под высокой температурой (250-500 ^{o}C).

7. Добавление искусственных компонентов, повышающих калорийность или связность элементов топлива (если это необходимо).

8. Изготовление брикетов с высокой энергетической теплоотдачей. Применение механического пресса.

Главным показателем качества топлива RDF для потребителя выступает его калорийность. Она весьма разнообразна на предприятиях такого профиля. Кто-то делает ставку на качество топлива, повышая его стоимость, а кто-то не делает акцент на его энергетические показатели, устанавливая невысокие цены. Калорийность топлива в большей степени зависит от содержания в отходах горючих фракций. Средние значения теплоты сгорания топлива RDF лежат в пределах от 12 до 18 МДж/кг. Хотелось бы отметить, что существуют методы для увеличения калорийности топлива. В него добавляются искусственные компоненты, обладающие высокой теплотворной способностью. За счет них характеристики и область применения RDF возрастает, увеличивается возможность возникновения предпри-

ятий работающих исключительно на таком сырье. Высокое содержание органических веществ в топливе и его искусственное обогащение приводит к повышению качества RDF и делает его конкурентно способным с действующими природными видами топлива.

Большое внимание при производстве и применении топлива RDF стоит уделять экологическому фактору. Должен проводиться серьезный анализ компонентов, входящих в состав топлива и продуктов их горения. В процессе сепарации должны исключаться варианты попадания вредных веществ в топливо. Обязательно осуществление периодического контроля количества вредных выбросов в атмосферу, оно должно соответствовать принятым законодательством экологическим нормам.

Цементная печь является в настоящее время самым экологически чистым агрегатом по утилизации отходов, в связи с этим наблюдается широкое применение топлива RDF в цементной промышленности. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

- ✓ высокой температуры материала (до 1450°С) и газовой среды (до 2000°С);
- ✓ значительного времени пребывания газов в горячей зоне - более 7 сек, при температуре выше 1200°С;
- ✓ щелочной средой материала в печи при наличии кислой атмосферы;
- ✓ движение материала и газов в противотоке;
- ✓ интенсивного контакта между твердыми и газообразными фазами;
- ✓ нейтрализации за счет жидкой фазы клинкера даже тяжелых металлов и токсичных материалов;
- ✓ практической безотходности самой цементной технологии;
- ✓ наличие в печных установках эффективных пылеуловителей.

Целесообразность применения топлива RDF довольно велика. В процессе производства решаются две важных задачи: экологическая и энергетическая. Экологический мотив очень велик, ведь проблема утилизации отходов принимает сейчас уже глобальное значение. С другой стороны в силу вступает экологический фактор. В наше время идет активный поиск альтернативных источников энергии и в этот момент очень кстати задуматься о таком виде топлива. Тем более оно привлекает своей дешевизной, доступностью и постоянной возобновляемостью. Количество органической фракции в ТБО составляет около 65%, на вторичную переработку и дальнейшее использование идет примерно 15%. Цифры, характеризующие перспективы развития этого направления, говорят сами за себя!

Утилизация органической части ТБО в цементных печах – это принятый во всём мире способ, дающий эффект не только экологический, но и экономический. В нашей стране законодательная база по этому вопросу попросту отсутствует, поэтому сложно организовать производство, не зная к каким стандартам стремиться. Но это не единственная сложность. Отсутствие раздельного сбора мусора тоже оказывает свое негативное воздейст-

вие на весь процесс. В итоге на данный момент мы видим, что большая часть ТБО вывозятся на полигоны, свалки и на другие территории, зачастую не предназначенные для захоронения отходов. В этой связи крайне необходима разработка федеральных и региональных программ сбора, сортировки и переработки отходов на основе современной законодательной базы и комплексного подхода в решении проблемы.

Использование альтернативного топлива RDF в качестве замены ископаемого топлива (угля, нефти, газа) позволяет снизить выбросы CO_2 в атмосферу, а также уменьшает зависимость экономики от ископаемого топлива. RDF топливо постоянно приобретает все большее значение в свете защиты окружающей среды и роста цен на энергоносители.

Замена ископаемых горючих ресурсов твердым топливом из отходов уже в течение многих лет во всем мире является одним из показателей современного технического уровня. России тоже следует идти этим путем, опираясь на мировой опыт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О Программе «Региональная целевая программа по обращению с твердыми бытовыми отходами в Санкт-Петербурге на период 2012-2020 годов»: Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 29.05.2012. – N 524
2. Журнал «Перспектива» [Электронный ресурс] // 2012 г. №2. URL: http://ecity.vlsu.ru/uploads/media/Journal__Perspektiva_2012_1..pdf (дата обращения: 10.04.2013)
3. Большой Энциклопедический словарь. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Большая Российская энциклопедия»; СПб.: «Норинт», 2000. – 1456 с.
4. http://www.eco-grad.ru/metody-pererabotki-musora.php (дата обращения 3.04.2013)

УДК: 631.3.03

Н. И. Наумкин, В. Ф. Купряшкин, А. С. Князьков, Е. Н. Панюшкина

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ГРУНТОВ ЗА СЧЕТ РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛА РЕЗАНИЯ НОЖЕЙ*



Николай Иванович Наумкин, д.п.н, к.т.н, доцент, заведующий кафедрой основ конструирования механизмов и машин
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева
Российская Федерация, г. Саранск,
тел./факс (8-8342) 254386, E-mail: naumn@yandex.ru



Владимир Федорович Купряшкин, к.т.н, доцент кафедры основ конструирования механизмов и машин
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева
Российская Федерация, г. Саранск,
тел./факс (8-8342) 254396, E-mail: kupwf@rambler.ru



Алексей Сергеевич Князьков, преподаватель кафедры основ конструирования механизмов и машин
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева
Российская Федерация, г. Саранск,
тел./факс (8-8342) 254396, E-mail: knjazkovaleksejj@rambler.ru



Елена Николаевна Панюшкина, аспирант кафедры прикладной математики
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева
Российская Федерация, г. Саранск,
E-mail: naumkinaen@yandex.ru

Аннотация

Рассматривается метод снижения энергоемкости фрезерования грунтов и почвы за счет регулирования углов резания инструмента, предлагаются устройства для его реализации.

Ключевые слова: энергоемкость, резание, фрезерование, фрезерные рабочие органы, угол резания, почвообрабатывающие машины

* Осуществлено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания, проект 53/18 – 12 «Формирование у студентов национальных исследовательских университетов компетентности в инновационной инженерной деятельности на основе погружения в инженерное творчество».

N.I. Naumkin, V.F. Kupryashkin, A.S. Kniazkov, E.N. Panyushkina

METHODS TO REDUCE THE ENERGY INTENSITY MILLING GROUND DUE ON ANGLE CUTTING BLADES

N. I. Naumkin[1], e-mail: naumn@yandex.ru;
V.F.Kupryashkin[1], e-mail: kupwf@rambler.ru;
A.S. Kniazkov[1], e-mail: knjazkovaleksejj@rambler.ru;
E.N.Panyushkina[1], e-mail: naumkinaen@yandex.ru
[1]Ogarev Mordovia State University.

Abstract

Is the method of reducing energy milling soils and soil by adjusting the angles of the cutting tool, the device for its implementation.

Key words: energy, cutting, milling, milling working parts, cutting angle, tillage machines

В современном сельском хозяйстве, строительстве и горном деле широко применяются фрезерные рабочие органы, которыми называются машины с вращающимися рабочими элементами. Фрезы применяют для интенсивного крошения почвы, уничтожения сорняков, измельчения растительных остатков, перемешивания слоев почвы, заделки удобрений и выравнивания обрабатываемой поверхности, экскавации грунта и других целей. Затраты энергии па обработку среды таким способом значительно превышают затраты ее при обработке другими машинами. Поэтому фрезеровать целесообразно тяжелые почвы и грунты, где требуется интенсивно измельчать грунтовые монолиты и уплотненные массы. Одними из недостатков таких фрез является сложность их устройства и повышенный расход энергии на обработку. По сравнению с традиционными пассивными рабочими органами, применение ротационных машин является целесообразным лишь в тех условиях, где обычные машины дают плохое качество обработки почвы и грунтов, имеют низкую производительность.

При фрезеровании такими машинами, двигаясь в почве, каждый нож фрезы отрезает сегментообразный почвенный пласт (стружку) и перемещает его в ограниченном пространстве закрытой борозды (рис. 1). В результате пласт крошится на мелкие частицы, размеры которых зависят от режима работы фрезы и свойств грунта. Интенсивность крошения грунта увеличивается с уменьшением толщины пласта и наоборот.

Обобщая известные исследования ученых по проблеме обработки почвы активными рабочими органами, В.Ф. Купряшкин [1, 2] сумел

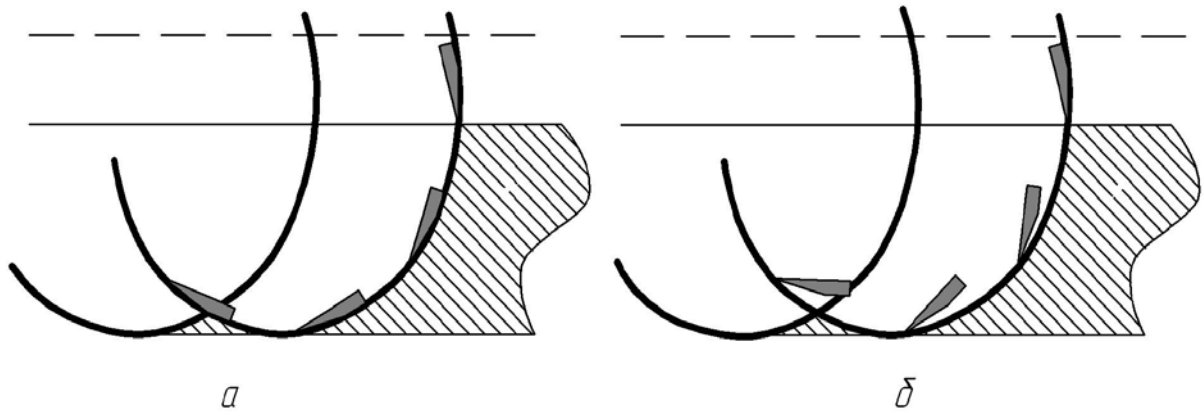


Рис. 1. Траектория движения ножа

выделить рабочую зону изменения углов резания самоходных малогабаритных почвообрабатывающих машин (СМПФ) в диапазоне скоростей поступательного движения фрезы от 1 до 4 км/ч, при которой отсутствует смятие почвы затылочной частью ножей. Тем самым, он предложил один из способов снижения энергоемкости фрезерования. Известна также номограмма, представленная М. Ф. Сениным [3] для определения углов установки рабочих органов на фрезбарабан в зависимости от глубины резания, диаметра барабана, угла заточки, ширины лезвия и кинематического параметра. Однако эти способы являются пассивными не обеспечивающими оптимальных энергетических показателей обработки почвы, так как для каждого нового положения фрезы необходим свой угол резания и не всегда оптимальный. В связи с этим возникает необходимость регулирования углов резания за весь рабочий цикл обработки среды. Рассмотрим способы и устройства, позволяющие совмещать возможности регулирования режимов и углов резания.

Исследования Г. Ф. Попова [4] показывают, что в процессе отрезания стружки обычным фрезерным барабаном значительно возрастает мощность, затрачиваемая на фрезерование, по сравнению с мощностью модернизированного инструмента, ножи которого имеют постоянный угол резания. При работе такого барабана (рис. 1, а), нож в процессе резания проходит по траектории трохоиды, описываемой каждым ножом, с минимальным углом отклонения от нее. При этом наблюдается минимальное сопротивление почвы о нож. Движение ножа в обычном барабане (рис. 1, б) происходит с изменением угла резания, что приводит к дополнительному сопротивлению резания. При этом происходит дополнительное смятие почвы и перемещение ее в свободную борозду, что отрицательно влияет на энергетические затраты.

При рассмотрении системы сил действующих на нож (рис. 2) можно выделить те из них, которые оказывают значительное влияние на энергоемкость фрезерования.

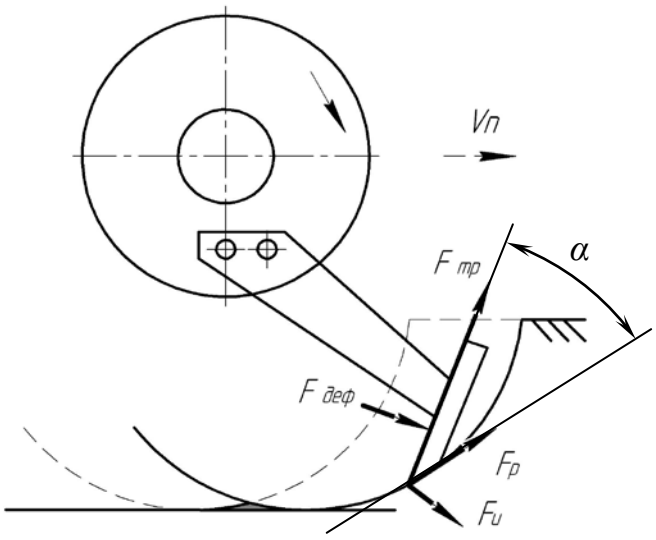


Рис. 2. Силы, действующие на нож

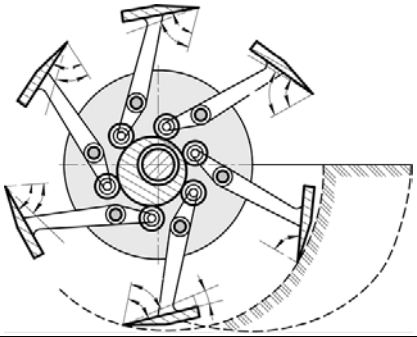
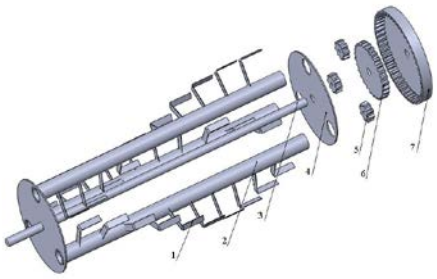
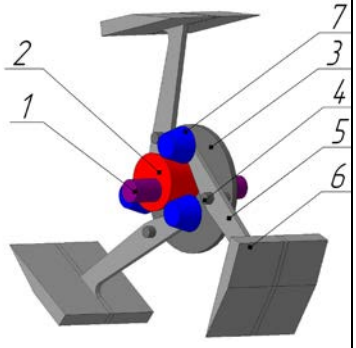
Сила резания $\boldsymbol{F}_p$, сила трения почвы о нож $\boldsymbol{F}_{тр}$, сила на деформацию отрезаемого пласта $\boldsymbol{F}_{деф}$, сила инерции на отбрасывание почвы $\boldsymbol{F}_u$ (рис. 2). Величина этих перечисленных сил, значительно изменяется от угла резания α. Уменьшив угол резания, можно уменьшить мощность на фрезерование почвы. При взаимодействии ножа фрезы с почвой можно выделить три фазы. В первой фазе нож, врезаясь в почву почти вертикально, отделяет от монолита большую часть объема срезаемой стружки, которая крошится и осыпается в образованную бороздку. Во второй – нож, продолжая срезать оставшуюся часть стружки, взаимодействует с почвой, которая заполняет профрезерованную канавку. При этом могут наблюдаться два процесса, существенно отличающиеся друг от друга. Если угол установки ножа большой, то почва накапливается перед ножом, тем самым, увеличивая сопротивление вращению фрезы. При малых углах установки нож как прямой острый клин движется в разрыхленной почве, которая пересыпается через его верхнюю грань. Деформация почвы в этом случае незначительная, следовательно, мало и сопротивление перемещению ножа. Третью фазу характеризует выход ножа из разрыхленного слоя почвы. Здесь также ножи с большим и малым углами установки взаимодействуют с почвой поразному. Нож с большим углом установки выбрасывает почву из канавки, следовательно, можно предположить, что нож с малым углом установки при выходе из разрыхленного слоя почву выносить не будет.

В табл. 1 представлены конкретные конструкции фрезерных машин, как используемых сегодня в практике, так и перспективные. Так, первую строчку в ней занимает фреза с постоянным углом резания, которая выпускается серийно и хорошо зарекомендовала себя при обработке ограниченных участков почвы.

Для обеспечения постоянства угла резания Г. Ф. Поповым [4] предлагается рычажное устройство (табл. 1). В нем, при вращении фрез барабана, стойка ножа, выполненная в виде коромысла, на одном конце которого установлен ролик, а на другом – нож. Ролик, обкатываясь по поверхности эксцентрика, заставляет поворачиваться коромысло, изменяя при этом угол резания ножа.

Однако конструкция таких фрезерных барабанов оказалась значительно сложнее обычного, что препятствует их практическому использованию.

Таблица 1 – Модели почвообрабатывающих фрез

№ п/п	Название	Конструкция фрезы	Примечание
1	Фреза с жестко установленным ножом		Достоинства: - простота конструкции; - надежность; - низкая стоимость Недостатки: - высокая энергоемкость
2	Фреза Г. Ф. Попова [4] с постоянным углом резания		Достоинства: -низкая энергоемкость; Недостатки: - сложность конструкции, - имеет преимущества только для одного режима резания
3	Фреза [5, 6] планетарная с изменяющимся углом атаки ножа		Достоинства: - высокая степень крошения почвы, низкая энергоемкость. Недостатки: - сложность конструкции, - однорежимность работы
4	Фреза многорежимная с постоянным углом резания МГУ им. Н. П. Огарева		Достоинства: -возможность обеспечения заданного угла резания при различных режимах; -низкая энергоемкость; Недостатки: - сложность конструкции

Мы предлагаем почвообрабатывающую фрезу с изменяющимся углом атаки ножа (табл. 1), в виде планетарного рабочего органа [5, 6], синтезированного при помощи адаптированной методики Л. Т. Дворникова и А. Э. Садиевой [7] идентификации плоских рычажных механизмов любой

сложности с зубчатыми и трансформированного впоследствии В. В. Дмитриевым [8] в метод конвертации. В ней при прохождении ножа в почвенном слое по траектории-трохоиде изменяет угол. Этот эффект достигается при помощи установки на фрезу нескольких фрез барабанов. При вращении вокруг основного вала фрез барабан при помощи зубчатых колес, образующих планетарную передачу, приводится во вращение. То есть, при прохождении в почве нож вращается вокруг основной оси и оси фрез барабана. Подбирая диаметры зубчатых колес и угловой скорости фрез барабана в зависимости от поступательной скорости фрезы можно добиться движения ножа по трохоиде с оптимальным углом установки ножа в определенном местоположении. При прохождении ножа в почве с оптимальным углом резания, устраняется трение ножа о почву и ее повышенное смятия, сопровождающие фрезерование почвы с жестко установленным ножом.

Такая почвообрабатывающая фреза состоит из трех фрез барабанов, на которых установлены ножи по винтовой линии с равным шагом. Каждый нож имеет индивидуальную длину и угол установки режущей кромки ножа. Для упрощения конструкции, возможно, использовать фрезы со спиралевидным ножом. Недостатком такой фрезы является сложность конструкции, большая металлоемкость, сложность изготовления и как следствие – незначительный ресурс, кроме того, она имеет свои преимущества только при одном режиме работы.

Для устранения этих недостатков нами предлагается фреза с изменяемым углом резания ножей при различных режимах работы (табл. 1), которая сохраняет постоянным угол резания не зависимо от поступательной скорости почвообрабатывающей фрезы. Для этого в ее состав, в отличие от фрезы Г. Ф. Попова, дополнительно введен конический ролик. При изменении режимов работы конический эксцентрик перемещается в сторону уменьшения или уменьшения диаметра эксцентрика, обеспечивая тем самым необходимый угол резания. Для проведения экспериментальных исследований был сконструирован и изготовлен опытный образец такого устройства (рис. 3).



Рис. 3. Фреза многорежимная

Основными преимуществами использования такой конструкции являются:

1) уменьшение мощности фрезерования почвы за счет уменьшения трения почвы о нож; 2) увеличение производительности за счет увеличе-

ния поступательной скорости фрезы и отсутствия трения о затылочную часть ножа (применение для навесных фрез); 3) повышение курсовой устойчивости фрезы за счет уменьшения выталкивающего усилия; 4) уменьшение высоты гребня; 5) сохранение постоянного угла резания не зависимо от поступательной скорости фрезы. Ее недостатками являются усложнение конструкции фрезы и уменьшение крошения почвы.

Использование почвообрабатывающих фрез с постоянным углом резания позволит сократить энергетические затраты при фрезеровании почвы, также обеспечивает необходимое качество рыхления почвы, в том числе тяжелой и влажной, обеспечивая при этом поступательное перемещение почвообрабатывающей машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.Ф. Купряшкин, Н.И. Наумкин, А.С. Князьков. Теоретические основы проектирования почвообрабатывающих фрез с изменяемым углом резания // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 2. – С. 62–63.
2. Анализ устойчивости движения самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы при ее качании относительно ходовых колес / В.Ф. Купряшкин и [и др.] // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2011. – № 11. – С. 113–119
3. Сенин М. Ф. Технологические и технические основы совмещения фрезерования почвы с посевом . – М.: Изд-во МСХА, 1991. – 184 с.
4. Синеоков Г. Н. Проектирование почвообрабатывающих машин. – М.: Машиностроение. 1965. – 311 с.
5. Синтез планетарных механизмов высокотехнологичных сельскохозяйственных машин методом их идентификации с рычажными / Н. И. Наумкин [и др.] / / Нива Поволжья. – 2010. – № 4. – С. 45–48.
6. Синтез планетарных рабочих органов высокотехнологичных почвообрабатывающих машин методом конвертации / Наумкин Н. И. [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 315 – 319.
7. Дмитриев В.В. Разработка алгоритмов структурного синтеза зубчатых механизмов : автореф. дис. … канд-та тех. наук / В. В. Дмитриев. – Новокузнецк, 2011. – 18 с.
8. Садиева А.Э. Разработка методов структурного синтеза сложных зубчатых механизмов / А.Э. Садиева : автореф. дис. … д-ра тех. наук / А.Э. Садиева. Бишкек, 2010. – 31 с.

УДК 621.81: 539.4

Б. Н. Поляков

НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЁТНОЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЯЖЁЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

(« Из инженерного завещания»)



Борис Николаевич Поляков,
доктор технических наук, проф., член-корр. Академии Инженерных наук Российской Федерации,
США, г. Вашингтон,
E-mail: bpoliakov@hotmail.com

Аннотация

Дается описание особенностей системы проектирования в тяжёлом машиностроении с позиции оценки надёжности обрудования, преимуществ и недостатков созданной расчётно-экспериментальной методологии оценки усталостной долговечности, вновь обосновывается нецелесообразность применения методов схематизации нагружённости, приводятся конкретные рекомендации, направленные на повышение точности идентификации факторов образующих методологию и точности оценки долговечности, в том числе, на совершенствование ГОСТ'а по методике проведения усталостных испытаний

Ключевые слова: усталостная долговечность, нагружённость, методы схематизации, накопление повреждений

B.N.Poliakov

THE SOME RECOMMENDATIONS FOR INCREASE OF ACCURACY OF DEFINITION OF RATED FATIGUE LONGEVITY OF THE EQUIPMENT OF HEAVY MECHANICAL ENGINEERING

(« From the engineering testament »)

Boris Nikolaevich Poliakov, Prof.-Dr., USA, Washington, E-mail: bpoliakov@hotmail.com

Abstract

The description of features of system of design in heavy mechanical engineering from a position of an assessment of reliability of the equipment, advantages and lacks of the created settlement-experimental methodology of an

assessment of fatigue longevity are given, again inexpediency of application of methods of a schematization stress loading proves, the specific recommendations which have been directed on increase of accuracy of identification of factors forming methodology and accuracy of an assessment of longevity, including, on perfection of GOST ’a on a procedure of carrying out of fatigue tests are resulted

Key words: fatigue longevity, load capacity, methods of a schematization, accumulation of damages

Проектирование оборудования индивидуального тяжелого машиностроения происходит в специфических условиях ограниченности исходной информации, что можно объяснить следующими причинами:

I. Часто отсутствует возможность натурной экспериментальной проверки принципиальных технологических и кинематических схем и конструкций машин, а при малых мощностях испытательных стендов и экспериментальных цехов, в лабораторных условиях невозможно воспроизвести реальную картину технологической нагружённости оборудования, из-за многообразия случайных факторов, действующих в реальных условиях металлургического производства, а также масштабного фактора при исследовании, например, термопластических состояний уникальных по габаритам несущих деталей.

2. Невозможно применить основные положения и методы теории массового обслуживания к оценке надежности и срока службы оборудования, поскольку сложно скомпоновать представительные статистики, содержащие систематизации внезапных или постепенных отказов однородных деталей, из-за большого разнообразия технологического оборудования и различий в условиях его монтажа, обслуживания и эксплуатации (отсутствие классификации и статистических оценок нагруженности), а также их малой информативности для проектирования. Применение методов “классической” теории надежности (оценка вероятности безотказной работы по интенсивности потока отказов) по аналогичным причинам тоже не позволяет управлять показателями качества на стадии проектирования. Например, невозможно научно обосновывать форму, параметры и материал деталей с необходимыми механическими свойствами, с требуемыми прочностными или другими служебными характеристиками, что особенно важно для конструкторов.

Таким образом, решение проблемы оценки надежности оборудования тяжелого машиностроения имеет ряд особенностей, вытекающих из индивидуального характера проектирования, изготовления и монтажа уникальных машин (весьма сложных

технических систем), крайне ограниченных экспериментальных возможностей, стохастических свойств технологических процессов и материала крупногабаритных деталей и, как следствие, случайного характера их нагружения. Объективной интегральной характеристикой надёжности конструкции является функция распределения её случайной долговечности или технического ресурса, информация о которой решает и многие важные производственные задачи: установление периодичности и объема ремонтных работ, формирование экономически обоснованного количества запасных частей и т.д., но и при проектировании создает условия для управления конструктивными и технологическими решениями - повышая надежность при снижении металло- и трудоемкости.

Принимая во внимание существующие объективные особенности создания уникальных машин [1], считаем, что единственно возможным способом получения функции распределения долговечности (ресурса) несущей тяжелонагруженной детали является расчетно–экспериментальная методология. Статистические характеристики нагруженности и усталостных свойств материалов, принимаемые при проектировании, предопределяют и последовательный статистический подход к методикам расчета плотности распределения долговечности, а значит, вероятности разрушения и ресурса.

На Уралмашзаводе, бывшем (к большому сожалению) индустриальном гиганте отечественного тяжёлого машиностроения, заводе огромного и высочайшего конструкторского, научного и инженерного интеллекта, на основе статистической теории прочности и теории случайных функций (теории выбросов), в 70-е годы прошедшего столетия была сформирована современная расчётно-экспериментальная методология и создан пакет компьютерных программ для оценки в вероятностном аспекте на стадии проектирования случайной долговечности (ресурса) при усталостном разрушении несущих деталей и сложных конструкций прокатного оборудования [1]. Работоспособность и информативность методологии и программного обеспечения убедительно доказаны при решении ряда сложных конструкторских и практических производственных проблем (см., например,[2]).

Применение различных статистических методов обеспечили следующие преимущества расчётной методологии:

1. Нагруженность несущей детали (или конструкции) рассматривается как случайный процесс ординат случайных напряжений в прямом его истолковании и идентифицируется корреляционной функцией, расчёт которой полностью обеспечивается известными компьютерными программами, а её погрешность определяется только погрешностью датчика измерения параметра нагружения;

2. Как следствие п.1 **полностью исключается применение методов схематизации** процесса нагружения, предусматривающих выполнение различных графических, ручных и трудоёмких, сугубо приближённых операций. Мои первые публикации (с соавторами) о применении теории случайных процессов, спектрального и корреляционного анализов к исследованию нагружённости и расчёту усталостной долговечности датируются 1975-1976гг. [3], где доказывается, что различные методы схематизации – это инженерные попытки свести реальный стохастический процесс к детерминированному описанию некоторого схематизированного процесса, который по уровню накопленного в детали усталостного повреждения должен быть эквивалентен реальному процессу, что приводят к 5 ÷ 8 - кратным отличиям в расчетных значениях усталостной долговечности. А если найден уровень накопленного усталостного повреждения от случайного процесса нагружения (что составляет конечную цель расчета), то нет необходимости и в его схематизации, в противном случае теряет смысл и остается неизвестной оценка эквивалентности. Кроме того, в период 80-х годов даже был разработан и действует ГОСТ 25.101-83, устанавливающий «методы схематизации случайных процессов нагружения, возникающих в условиях эксплуатации или испытаний**...** «Прошло почти 40 лет и вновь появляются работы, в том числе и диссертационные, с применением методов схематизации (см. Интернет).

Я не верю, что исследование случайного процесса нагруженности (СПН) строгими методами корреляционного и спектрального анализов может быть адекватно по точности различным моделям приближённой схематизации, не дающих те же оценки точности (ибо любое преобразование информации – это всегда потеря какой-то доли информации и внесение погрешности). Любой метод схематизации СПН **не может** учитывать весь спектр амплитуд и частот случайного процесса за временной период. Да и зачем в настоящее время мощных современнейших компьютеров заниматься разработкой и применением методов схематизации? Это в 60-е- 70-е годы прошедшего столетия нам было необходимо нескольно недель и чаще - месяцев, чтобы вручную подготовить исходную информацию (выполнить квантование процесса нагруженности по времени и по уровню, отображённого на бумажной осциллограмме) и рассчитать на ЭВМ "Урал- 4" или "Минск- 22" по собственным программам корреляционные функции и спектральные плотности. В сегодняшнее время для этих процедур необходимо всего несколько минут. Зачем продолжать сочинять и применять искусственные различные методы схематизации, когда имеются строгие математические методы и компьютерные программы анализа узко – и широкополостных случайных процессов. Да и пора уже осовременить ГОСТ 25.101-83, наполнив его компьютерным содержанием. Итак, в разработанной

методологии предусматривается полная компьютеризация подготовки экспериментальной информации о нагружённости, её спектральный и корреляционный анализ с известными оценками погрешности;

3. Все основные параметры усталостных свойств материала детали (предел ограниченной выносливости, угол наклона и абсцисса точки перелома кривой усталости) рассматриваются только как случайные величины, с известными функциями распределений и их параметрами и представляются в виде полных вероятностных диаграмм усталости (см. рис.), обладающих высокими статистическими надёжностью и точностью для любой задаваемой вероятности разрушения [1];

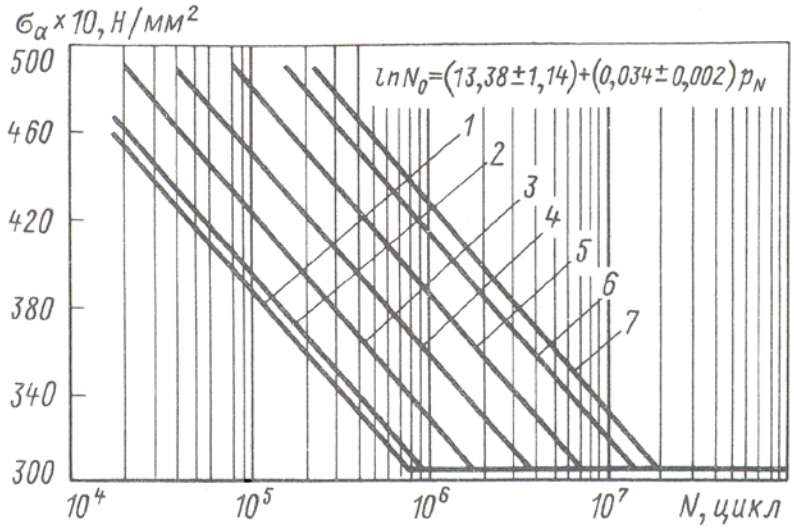


Рис. Вероятностная диаграмма усталости образцов из стали 38ХГН при изгибе с вращением (1–p_N=5%; 2–10%; 3–30%; 4–50%; 5–70%; 6–90%; 7–99,9%)

4. Образование расчётной методологии в форме пакета компьютерных программ, предусматривающих возможность представления исходной информации о нагруженности в виде отдельных реализаций ординат напряжений или деформаций (временных рядов) и широкой гаммы статистических характеристик, допускающих вариацию всех параметров диаграмм усталости (как в детерминированном, так и в статистическом аспекте), позволяет эффективно их применять при проектировании, что убедительно доказано конструкторской практикой создания прокатного оборудования на Уралмашзаводе.

Таким образом, два экспериментальных фактора: нагруженность и усталостные свойства детали или материала, корректно представлены в математической модели усталостной долговечности своими надёжными статистическими оценками с известной погрешностью. И единственным фактором не имеющим никаких оценок точности, вносящим существенную неопределённость и повышающим погрешность искомой величины, является параметр, характеризующий процесс накопления повреждений, который при этом абсолютно не отражает физическую

природу разрушения. В некоторой мере, именно поэтому современные расчётные модели долговечности предоставляют более надёжные качественные оценки, и менее точные – количественные, при сниженных частоте и областей их применения.

Итак, что же следует предпринять, т.е. какие необходимо выполнить исследовательские работы (с нашей точки зрения) для того, чтобы значительно приблизить результаты расчёта случайной долговечности (вероятности разрушения и ресурса) к приемлемой инженерной погрешности. Прежде всего, целесообразно продолжить параметрические исследования, а также на основе методов теории чувствительности, необходимо определить численные величины коэффициентов влияния (существенности или точностных характеристик) каждого фактора на функцию долговечности и ранжировать их, с целью получения оценок тех допустимых величин погрешностей идентификации факторов, которые обеспечат преемлемую для практики точность оценки долговечности. Первый опыт приближённой оценки чувствительности, для случая исследования долговечности несущих деталей главного привода прокатного стана, показал высокую информативность созданной методологии [1]. В частности, подтверждено, что увеличение дисперсии напряжений ведет к росту вероятности разрушения и сокращает срок службы оборудования, при этом понижение математического ожидания напряжений вызывает почти пропорциональное уменьшение вероятности разрушения, кроме того, при приближении математического ожидания напряжений к пределу выносливости, вероятность разрушения определяется только их величинами и в меньшей степени зависит от дисперсии напряжений (подробнее см. [1]).

По диаграммам усталости имеются две рекомендации. Проведённые на Уралмашзаводе уникальные исследования усталостных свойств образцов, вырезанных из крупногабаритных заготовок четырёх марок стали, позволили получить громадный объём экспериментальной информации статистическая обработка которой обеспечила построение полных вероятностных диаграмм усталости (уравнений регрессии) с очень высокими величинами коэффициентов множественной корреляции - в диапазоне 0,94-0,97, следовательно, коэффициенты детерминации находятся в диапазоне 0,88-0,94, т.е. 6-12% факторов не отражаются параметрами уравнений регрессии, которые, по нашему мнению, должны характеризовать структурную неоднородность материала, являющуюся (по результатам металлографических исследований усталостных разрушений деталей металлургического оборудования) одной из главных причин зарождения усталостных трещин [4]. Поэтому, с целью дальнейшего увеличения информативности и достоверности диаграмм усталости предлагается: во-первых, проводить усталостные испытания с компьютерным контролем параметров микроструктуры поверхности

разрушения образцов (что, конечно увеличивает трудоёмкость и стоимость экспериментов) и, во-вторых, испытания следует проводить не при детерминированном циклическом нагружении, а при последнем, реализующим корреляционную функцию и тот спектральный диапазон частот, соответствующий идентификации зафиксированного исходного временного ряда случайного процесса нагружённости (например, моделироваться на INSTRON'ах).

Так как в дальнейшем, без сомнения, будет повышаться стоимость усталостных испытаний, считаем целесообразным на основе методов оптимального планирования экспериментов, разработать методику и решить задачу поиска плана эксперимента, который управлялся бы от компьютера и обеспечил бы существенное сокращение общего объёма испытаний для каждой марки стали, для решения которой большие возможности предоставляют результаты вышеупомянутых статистических исследований усталостных свойств четырёх марок сталей.

Относительно закономерности накопления повреждений. В общем случае возникновение необратимых повреждений и их объединение зависит от особенностей нагруженности и структуры исследуемого материала, т.е. процесс накопления повреждений в какой-то момент и приводит к образованию усталостной трещины. Значит, результаты усталостных испытаний должны служить основой и для формирования статистической закономерности накопления повреждений (ибо их «природа» одна и та же: одно является следствием другого).

Большой объём исходной информации (более 800 измерений с учётом пробных образцов), полученный при экспериментальных исследованиях усталостных свойств четырёх марок сталей (например, см. табл.), позволяет, применяя известные математические методы идентификации [5] и статистического моделирования, получить оценки (в том числе и статистические) процесса накопления усталостных повреждений в исследованных сталях, т.е. проверить и уточнить гипотезу суммирования и меру повреждений. В частности, можно предложить следующие постановку и решение задачи идентификации. Корректируем математическую модель долговечности для условий проведённых усталостных испытаний введя параметры циклического нагружения, представляем математическое выражение гипотезы суммирования повреждений как степенную функцию с показателем степени «K» отношения числа циклов нагружения на i - м участке к числу циклов до разрушения, и тогда задача сводится к идентификации коэффициента «K» на основе экспериментальной информации: σ_i - уровень напряжений - число циклов до разрушения N (экспериментальная долговечность) - p_N - вероятность разрушения, определённая по интегральной эмпирической функции нормального распределения N. Точность процедуры идентификации коэффициента «K» определяется по

отклонению расчетной величины долговечности N_P от замеренной N, вычислением относительного отклонения $(N_P - N)/N$. Таким образом, идентификация коэффициента «K» заключается в минимизации функции $\Delta = (N_P - N)/N$ с задаваемой погрешностью (по аналогии с [6]). Построив итерационный алгоритм реализации этой постановки, только для вероятностной диаграммы усталости при заданной вероятности разрушения, можно получить функции распределения коэффициента «K» при различных уровнях нагружения: предполагаем, что на уровне максимальных напряжениях его средняя величина будет близка к единице и имеет место линейная связь с N, при средних уровнях будет иметь место параболическая зависимость, а на уровнях близких к пределу выносливости - гиперболическая. Возможно удастся получить статистически надёжную и точную связь коэффициента «K» с уровнем напряжений и вероятностью разрушения (а в будущем и с параметрами микроструктуры материала), тем самым можно существенно уточнить гипотезу накопления повреждений. Таким образом, решая задачу идентификации или применяя другие компьютерные методы определения статистических оценок закономерности суммирования повреждений (с известной погрешностью) по экспериментальным данным усталостных испытаний, можно существенно повысить точность расчёта долговечности для каждой марки стали. Так что существующий ГОСТ 25.504-82 - «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости», необходимость совершенствования которого объективна и целесообразна, рекомендуем дополнить методами определения статистических оценок закономерности суммирования повреждений.

И наконец, последняя рекомендация. Для того, чтобы окончательно убедиться в том, что корреляционный и спектральный анализ случайного процесса представляет собой наиболее адекватный метод для исследования стохастической нагруженности, предлагается для большого разнообразия корреляционных функций, представленных в работе [4], рассчитать усталостную долговечность, сравнив результаты с аналогичными расчётами, но только с использованием схематизации нагрузок (от метода размахов до метода «дождя»). Убеждён, что возможный диапазон различий в оценках будет в диапазоне минимум 10-15 %. Так что, выполнение точностной оценки диапазона колебаний усталостной долговечности для различных корреляционных функций нагруженности и для различных методов схематизации будет основанием для широкого применения теории случайных процессов в расчётной практике при проектировании.

Таблица

Результаты усталостных испытаний при изгибе с вращением образцов из стали 38ХГН

Пробные образцы	
σ_i	$N_i \cdot 10^{-3}$
30	29441*
	15297*
31	2270
	27015*
34	358,4
55	20,6
65	5,5

Уровень напряжений - σ_i, Н/мм^2						
315	320	330	350	400	450	500
Число циклов до разрушения - $N_i \cdot 10^{-3}$						
1898	561,8	514	439,1	58,0	98,5	27
660	574,5	546,6	825,6	693,5	65,5	34
451,7	21765*	521,5	777	453,9	73,7	16
939,8	14009*	601,8	7093,5	875	61,8	79
10875*	14009*	622,2	11864,5*	177	141,3	36,5
10871*	14009*	913,9	11076*	115	103	24,7
13801,2*	1738	875,3	436	120,5	107,5	26
516,1	1913	11709,3*	258	195,2	100,5	42,1
13789,5*	11037*	1576,6	12556,3*	279,4	77,0	26,2
10861*	5160	1719,1	379,5	190,8	113,5	46,4
482	8484,1	862	553	1019,7	46,6	22,8
11409,5*	1208,4	503,5	443	175,4	73,6	83,2
8800,8	743,5	4808	325,6	216,3	73,8	21,6
2960,8	13630,5*	477,2	8524,1	209,2	52	82,4
13885,5*	13631,5*	12049,6*	403,5	81	75	22,1
532,4	10292*	2856	10328*	127	70	21,1
13354,4*	939,5	14016,5*	2257,6	232,8	39	45
13354*	1870,9	695,2	259,7	94,7	221	17,2
1578,3	1941,7	951,5	235,5	476,2	56,7	98,8
316	542,5	10065,6*	259,4	369	482	21,4
10232,7*	23464,8*	13818*	178,5	110,8	99	18
1712,2	23464,1*	11098,5*	693,3	138	40,4	95
574,2	404,2	14386*	10467,5*	98	62,7	63,4
11532,8*	22744,3*	14385,2*	378	211	64,0	26
11531,9*	970	13152,2*	10818*	137	122,3	34,7
1858,8	21748,6*	14279,5*	628,4	118	49,0	18
* - неразрушенные образцы						

Будем оптимистами и будем надеяться, что в будущем появится многоинформативная и высокой точности компьютерная методика расчёта усталостной долговечности несущих деталей, которая будет даже обосновывать требования к структуре и усталостным свойствам

необходимой для конструкции марки стали. Тем не менее, в ближайшее десятилетие для обеспечения гарантированного срока службы оборудования сохраняется актуальность традиционных методов повышения долговечности на стадии проектирования, когда предпочтение следует отдавать поиску новых конструкторских решений и применять соответствующие технологические методы, например, формирование при термообработке фона сжимающих остаточных напряжений в зонах повышенных нагрузок, применение поверхностного пластического деформирования или лазерного упрочнения и т.п., а на стадии эксплуатации, там где возможно (особенно на тяжелонагруженных приводах машин), применять компьютерные системы программного управления [1], формирующие щадящие режимы нагруженности оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков Б.Н. Повышение качества технологий и долговечности оборудования прокатных станов. – Екатеринбург: Изд - во Урал. гос. проф.- пед. ун - та, 1994. Ч.2. –192 с.
2. Макаров Ю. Д., Поляков Б. Н., Ронин И. Л. Выбор мощности главных приводов унифицированного блюминга // Сталь. 1987. № 4. С. 53-55.
3. Определение долговечности деталей машин при усталостном разрушении / Ю. В. Денисов, М. Л. Комиссарова, Б. Н. Поляков и др. // Изв. Вузов. Машиностроение. 1975. № 10. С. 50-55.
4. Нагруженность, несущая способность и долговечность прокатного оборудования / Б. Н. Поляков, Ю. И. Няшин, И. Ф. Волегов, А. Ф. Трусов. – М.: Металлургия, 1990. 320 с.
5. Райбман Н.С. Что такое идентификация? – М.: Наука, 1970. – 119 с.
6. Макаров Ю. Д. Идентификация и статистические ценки энергосиловых параметров процесса холодной прокатки полос из стали 08Ю на стане 1700 ОАО «Северсталь» [Электронный ресурс] // Инженерное образование: «Наука и образование». URL: http://technomag.stack.net/doc/91816.html (дата обращения: 05.05.2011).

УДК 658.78.06, 62-1

А. Е. Радаев

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПАРКА ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СКЛАДСКОЙ СИСТЕМЫ



Антон Евгеньевич Радаев, ассистент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-8401, E-mail: TW-inc@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов. Разработана процедура формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования путем поэтапного решения задач формирования альтернативных вариантов состава подъемно-транспортного оборудования по различным иерархическим уровням с последующим обоснованием наиболее предпочтительных вариантов.

Ключевые слова: складская система, подъемно-транспортное оборудование, оптимизационная модель, имитационное моделирование.

A.E. Radaev

FORMATION OF HANDLING MACHINERY BASE'S STRUCTURE FOR WAREHOUSE SYSTEM

Anton E. Radaev, St.Petersburg State Polytechnical University, Russia
e-mail: TW-inc@yandex.ru.

Abstract

The article covers issues concerning reasoning of handling machinery base's structure for warehouse system of package-by-package goods. The procedure of formation of handling machinery base's structure, which is proposed during the research, supposes step-by-step solving the tasks of creation of alternative variants concerning structure of machinery in line with different hierarchical levels and further reasoning of the most appropriate variants.

Key words: warehouse system, handling machinery, optimization model, simulation modeling

В современных условиях развития промышленных и торговых предприятий особую важность приобретают вопросы обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования (ПТО) складских систем, используемого для реализации процессов грузопереработки в сферах снабжения, производства и сбыта, в соответствии с требованиями по производительности, надежности, стоимости и т.д., обеспечивающими эффективное функционирование и устойчивое развитие предприятий. Применяемые на сегодняшний день аналитические подходы к решению вышеуказанной задачи основаны на большом количестве существенных допущений и в современных условиях функционирования складских объектов не обеспечивают приемлемой точности получаемых результатов. Вместе с тем мировая и отечественная практика все больше ориентируется на использование средств имитационного моделирования в процессе реализации проектов по проектированию или реорганизации функционирования складских систем [1,2,3]. При этом в научной литературе отсутствуют какие-либо конкретные инструментальные средства, позволяющие наиболее эффективно использовать современные парадигмы имитационного моделирования для решения задачи формирования структуры парка ПТО. Вышеуказанные обстоятельства определили актуальность выбранной темы исследования, постановку его цели и основных задач.

Основу исследования составляет складская система, под которой в данном случае понимается территориально обособленное подразделение в составе торгового или промышленного предприятия, по отношению к которому выделяют внешние и внутренние грузопотоки, проходящие через определенные технологические зоны (приемки, хранения, комплектации) в виде так называемых грузовых единиц (транспортных средств, паллет, коробов и т.д.), обрабатываемых с использованием оборудования для погрузочно-разгрузочных работ (откидных мостов, доклевеллеров и т.д.), оборудования для хранения грузов (стеллажей различных типов), машин непрерывного транспорта (конвейеров различных конструкций) а также напольного рельсового и безрельсового ПТО, которому и уделяется основное внимание в данной работе.

Объектом исследования является складская система, в составе которой осуществляется обработка тарно-штучных грузов с использованием ПТО. Традиционно к тарно-штучным относят паллетированные и контейнеризованные грузы, обрабатываемые на распределительных складах и контейнерных терминалах соответственно. Однако в рамках исследования к тарно-штучным предлагается относить собственно штучные грузы ввиду схожести соответствующих технологических процессов. Общая информация об объекте исследования представлена на рис. 1.



Рис. 1. Общие сведения об объекте исследования

Целью исследования является разработка инструментальных средств, обеспечивающих формирование структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов на этапах проектирования и эксплуатации.

Основными задачами исследования являются:

– провести анализ подходов к решению задачи формирования структуры парка ПТО на складах тарно-штучных грузов;
– предложить процедуру формирования состава ПТО в разрезе функциональных групп и классов, используемых в рамках складской системы тарно-штучных грузов;
– предложить систему показателей для оценки эффективности функционирования парка подъемно-транспортного оборудования в складской системе тарно-штучных грузов;
– разработать и реализовать на практическом примере методику формирования структуры парка ПТО для склада тарно-штучных грузов.

В соответствии с вышеперечисленными задачами на начальных этапах исследования был произведен обзор и анализ существующих подходов к решению задачи формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования. Как правило, все существующие методические разработки предполагают последовательное выполнение следующих основных этапов [4,7,8]:

– выделение в рамках исследуемого складского объекта технологических зон (погрузки / разгрузки транспорта, промежуточного и основного

хранения грузов, комплектации и т.п.) по принципам пространственной обособленности и общности складских работ, выполняемых конкретными видами подъемно-транспортных машин;
– формирование альтернативных вариантов подъемно-транспортной техники для каждой выделенной технологической зоны с последующим определением наиболее предпочтительного варианта при решении одно- и многокритериальных задач выбора;
– обоснование необходимого количества выбранного варианта ПТО с использованием функциональной зависимости числа единиц техники от усредненных значений интенсивности поступления грузовых единиц (ГЕ), и длительности обработки одной ГЕ единицей оборудования.

Вышеописанная методика решения задачи формирования структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов имеет ряд недостатков, основными из которых являются:
– соответствие технологических зон склада однородным группам подъемно-транспортной техники не всегда подтверждается практикой: ввиду универсальности выполняемых операций грузопереработки определенные виды оборудования зачастую работают в различных территориально обособленных технологических зонах (например, безрельсовые электротележки могут быть использованы как при погрузке / разгрузке транспортных средств, так и в стеллажной зоне);
– выбор конкретного варианта ПТО лишь по техническим характеристикам и стоимости единицы техники и отсутствие учета при этом потребного количества оборудования
– определение потребного количества выбранного варианта ПТО с использованием аналитических зависимостей с усредненными значениями параметров функционирования складской системы не учитывает влияние фактора времени и стохастичности характеристик реальных процессов грузопереработки на число единиц техники, что негативно сказывается на точности конечных результатов.

Вышеперечисленные недостатки определили целесообразность уточнения существующей постановки задачи формирования структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов, для чего были последовательно выполнены следующие этапы:
1. Уточнена классификация задач формирования структуры парка ПТО, для решения которых предполагается использовать разрабатываемые инструментальные средства (рис. 2). Указанные задачи предлагается структурировать по стадиям жизненного цикла складского объекта, способу организации функционирования оборудования и целевому критерию. В последнем случае речь идет преимущественно о двух способах постановки задачи, отличающихся друг от друга критерием поиска решения и ограничением области допустимых вариантов решений. Так, формирование структуры парка оборудования может производиться

либо по критерию максимизации пропускной способности склада с ограничением по стоимости оборудования, либо по критерию минимизации затрат на ПТО с ограничением по требуемому уровню производительности. В данной статье основное внимание уделяется именно задаче минимизации затрат.

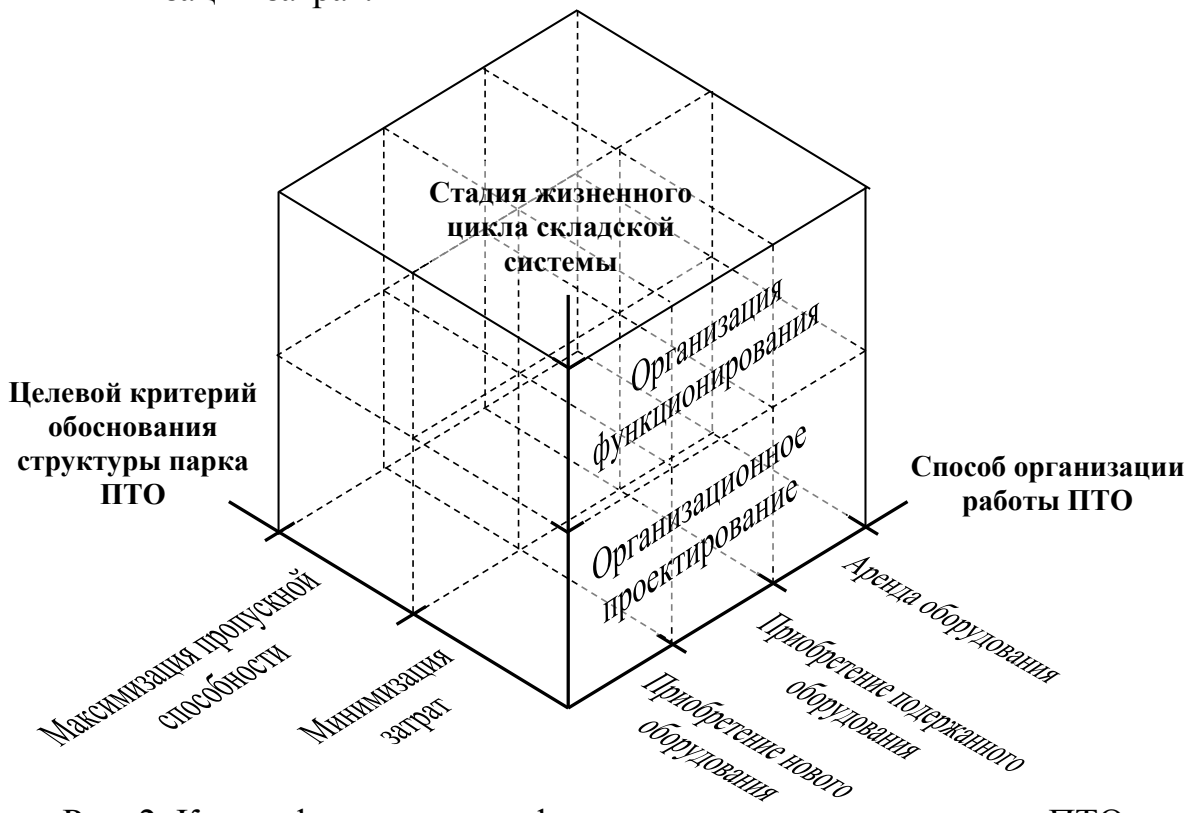


Рис. 2. Классификация задач формирования структуры парка ПТО

2. Предложена иерархическая структура парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов, предполагающая наличие трех структурных уровней, соответствующих следующим уточненным понятиям:
   – класс ПТО – разновидность подъемно-транспортной техники, характеризуемая набором отличительных особенностей конструкции механизмов передвижения, подъема и выдвижения грузозахватного устройства, а также совокупностью технических характеристик (в том числе грузоподъемности, рабочих скоростей механизмов, пространственно-габаритных характеристик, параметров маневренности, проходимости и т.д.), варьируемых в установленных диапазонах;
   – функциональная группа ПТО – совокупность единиц подъемно-транспортной техники одной или нескольких марок, выполняющая определенную группу последовательных операций грузопереработки в рамках установленного технологического маршрута или технологической зоны складской системы;
   – марка ПТО – разновидность подъемно-транспортной техники (изготавливаемой определенным производителем) в составе функцио-

нальной группы ПТО, характеризуемая определенным набором стоимостных и технических характеристик (с установленными значениями).

Пример предложенной структуры парка оборудования представлен на рис. 3. Таким образом, каждому классу ПТО (например, погрузчики) в общем случае может соответствовать несколько функциональных групп оборудования (погрузчики для работ на открытых площадках, внутрискладские погрузчики и т.п.), каждая из которых может включать в себя марки ПТО как одного (различие заключается в моделях оборудования), так и различных производителей техники.

На базе вышеописанных разработок в рамках исследования была предложена процедура формирования структуры парка ПТО, включающая в себя следующие этапы (рис. 4):

1. Формирование альтернативных вариантов структуры классов ПТО с предварительной проверкой:
   – соответствия стоимости ПТО, затрат на создание склада (при организационном проектировании) либо на обеспечение условий эксплуатации (при организации функционирования) оборудования объему располагаемых денежных средств;
   – соответствия ПТО требованиям СНиП (при организационном проектировании) либо фактическим параметрам (при организации функционирования) складского объекта в части габаритно-пространственных характеристик помещений, ровности опорных покрытий, допустимой нагрузки на опорные покрытия и т.п.;
   – соответствия ПТО требованиям норм пожарной безопасности, экологичности и т.д.
2. Формирование альтернативных вариантов структуры функциональных групп ПТО для каждого альтернативного варианта структуры классов оборудования с предварительной проверкой соответствия средней длительности технологического цикла, реализуемого совокупностью функциональных групп ПТО, нормативному значению, указанному в регламенте складских работ.
3. Формирование альтернативных вариантов марок ПТО в составе каждой выделенной функциональной группы с предварительной проверкой соответствия параметров эргономичности, шумности, экологичности рассматриваемой марки ПТО требуемым (нормативным) диапазонам.
4. Обоснование оптимального состава ПТО в рамках каждой выделенной функциональной группы путем решения оптимизационной задачи, содержащей целевой критерий обоснования структуры парка ПТО (см. рис. 2), с использованием средств аналитического или имитационного моделирования.
5. Суммирование значений параметров затрат и производительности, вычисленных в процессе решения оптимизационных задач в соответствии

с п. 4, в рамках каждого альтернативного варианта структуры функциональных групп ПТО. Обоснование оптимального варианта структуры функциональных групп ПТО путем решения многокритериальной задачи выбора на основе известных для каждого альтернативного варианта значений параметров затрат и производительности.

6. Суммирование значений параметров затрат и производительности, вычисленных в процессе решения многокритериальных задач выбора в соответствии с п. 5, в рамках каждого альтернативного варианта структуры классов ПТО. Обоснование оптимального варианта структуры классов ПТО путем решения многокритериальной задачи выбора на основе известных для каждого альтернативного варианта значений параметров затрат и производительности.

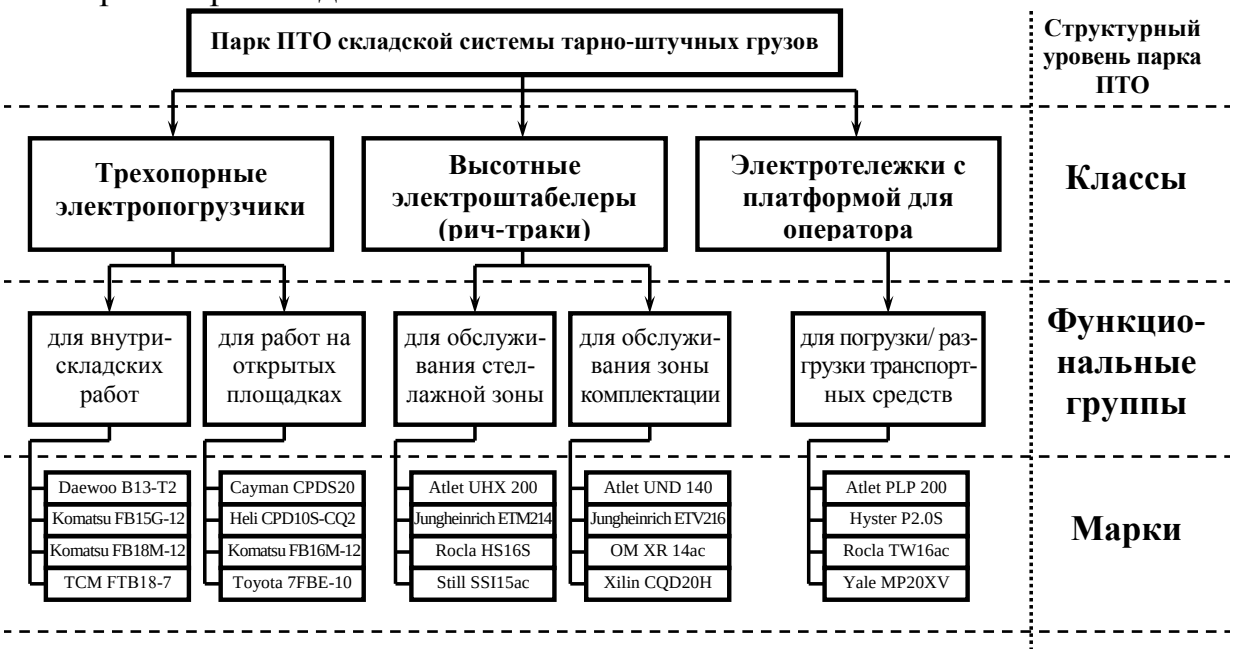


Рис. 3. Пример предложенной структуры парка ПТО складской системы

Для решения задачи обоснования состава ПТО в рамках определенной функциональной группы, соответствующей п. 4 вышеописанной процедуры, было предложено использовать средства аналитического и имитационного моделирования. В первом случае предполагается производить построение оптимизационной модели с использованием элементов теории систем массового обслуживания (СМО), основными из которых являются следующие [5]:

– заявки (требования) – описывают однородные укрупненные ГЕ, образующие входной грузопоток для определенной функциональной группы;
– физические каналы обслуживания – описывают элементы объемно-планировочного решения, обуславливающие ограниченную пропускную способность складской системы;

– организационные каналы обслуживания – определяются группами ПТО, обслуживающими заявки (требования), находящиеся в физических каналах обслуживания;
– очередь – описывает совокупность заявок (требований), ожидающих обслуживания при полной загрузке имеющихся каналов;
– механизм обслуживания – определяет последовательность операций грузопереработки, осуществляемых ПТО в процессе обслуживания поступающих заявок (требований).

В состав исходных данных для построения оптимизационной модели предлагается включать временные характеристики поступления заявок (требований) различных типов; временные характеристики обработки заявок различными вариантами оборудования; располагаемое количество физических каналов обслуживания; максимальное количество единиц ПТО в организационном канале обслуживания; экономические параметры в расчете на единицу оборудования (при приобретении нового или подержанного оборудования – первоначальная или остаточная стоимость оборудования соответственно, при аренде ПТО – текущие затраты, в том числе арендные платежи).

В качестве искомых величин оптимизационной модели целесообразно назначать параметры количества альтернативных вариантов ПТО в составе функциональной группы.

Прямые ограничения на искомые переменные должны быть сформированы на основе информации о количестве единиц техники, располагаемом соответствующим поставщиком ПТО, а также об особенностях объемно-планировочного решения технологических зон складского объекта в части

При формировании целевой функции, а также структурных ограничений необходимо использовать показатели суммарных затрат по всему парку оборудования, а также показатели производительности (средняя длительность обработки требований, вероятность образования очереди, средняя длина очереди), вычисляемые по известным аналитическим зависимостям в области теории СМО. Так, например, для функциональной группы ПТО, осуществляющей погрузку / разгрузку транспортных средств в соответствующей технологической зоне целесообразно выделить СМО с ограниченной и неограниченной длиной очереди, содержащие соответственно организационные и физические каналы обслуживания (рис. 4). С использованием известных функциональных зависимостей на основе исходных данных для СМО с ограниченной длиной очереди можно рассчитать среднее время ожидания обслуживания требованиями (транспортными средствами), на основе которого вычислить среднее время простоя (ожидания обслуживания и непосредственной погрузки / разгрузки) транспорта, вероятность образования очереди транспортных средств и ее среднюю длину в рамках СМО с неограниченной длиной очереди. Указанные показатели

производительности функциональной группы ПТО так же, как и показатели затрат на оборудование, являются функционально зависимыми от искомых переменных имитационной модели. При этом если одна разновидность показателей (например, показатели производительности) используется при формировании целевой функции, другая должна обеспечивать построение структурных ограничений.

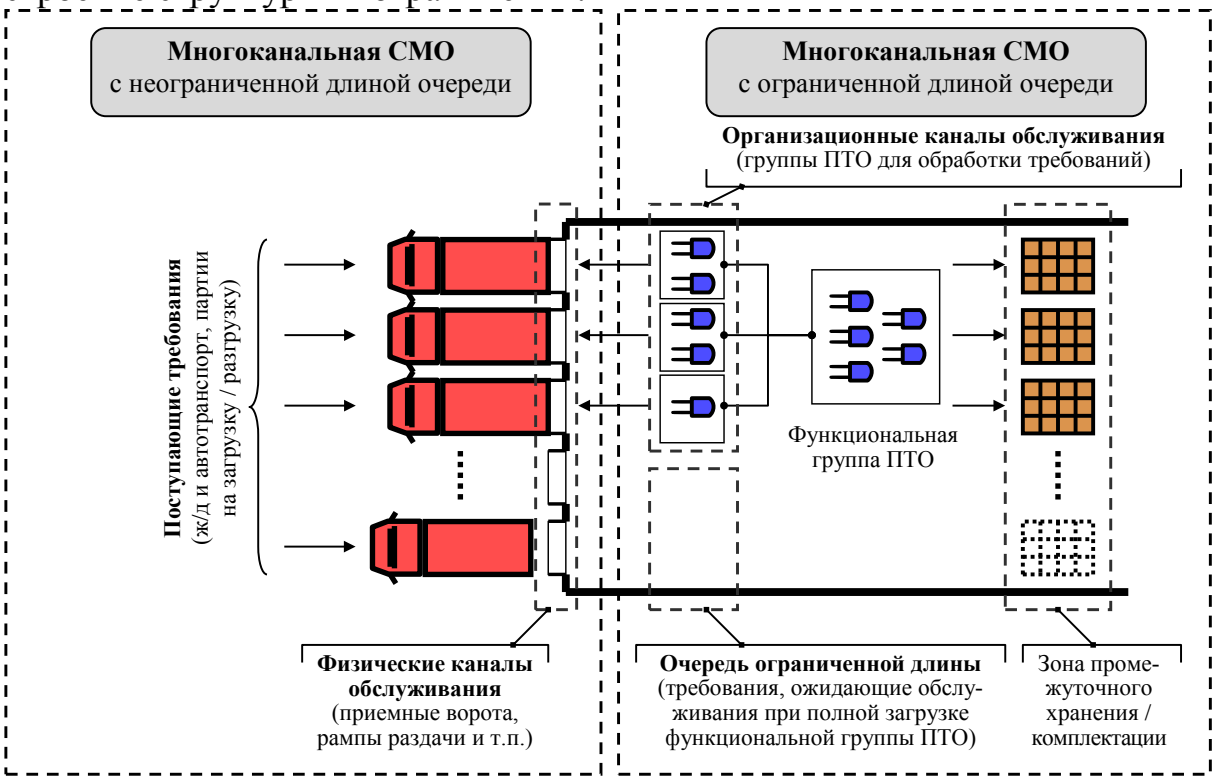


Рис. 4. Основные элементы теории СМО, выделяемые в процессе решения задачи обоснования оптимального состава функциональной группы ПТО

В отличие от существующих разработок, предложенный подход к решению задачи обоснования оптимального состава функциональной группы ПТО, на наш взгляд, более адекватно описывает процессы складской грузопереработки и потому обеспечивает несколько большую точность получаемых результатов. Однако использование усредненных показателей производительности при построении вышеописанной оптимизационной модели свидетельствует об ограниченности учета стохастических параметров функционирования складской системы и определяет целесообразность применения подхода лишь в целях предварительного расчета потребного количества оборудования. Для более детального исследования влияния большого количества факторов функционирования складской системы на потребное количество ПТО используются средства имитационного моделирования [9].

В рамках исследования был проведен анализ всех существующих на сегодняшний день парадигм имитационного моделирования [3,6], по результатам которого сделан вывод о целесообразности использования дис-

кретно-событийного подхода для моделирования процессов грузопереработки в рамках складской системы тарно-штучных грузов. Основными элементами указанного подхода являются:

– заявки – однородные объекты (ГЕ, транспортные партии и т.п.), обладающие уникальными свойствами, поступающие в моделируемую систему, преобразуемые в ней и убывающие из нее по определенным принципам;
– ресурсы – неотъемлемые относительно моделируемой системы объекты (приемные ворота, единицы ПТО, складской персонал и т.д.), обладающие уникальными свойствами, взаимодействующие с заявками по определенным правилам;
– потоковые диаграммы – специальные схемы, определяющие алгоритм движения и преобразования (в том числе взаимодействия с ресурсами) заявок внутри моделируемой системы, т.е. технологию грузопереработки;
– сети – совокупность графических объектов, обеспечивающих движение заявок и ресурсов в заданные положения по заданным маршрутам в соответствии с объемно-планировочным решением моделируемой системы.

Использование указанных элементов при решении задачи формирования структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов наиболее полно удовлетворяет основным принципам рациональной организации процессов грузопереработки (таким, как прямоточность, параллельность и т.д.), а обеспечиваемый соответствующими средствами имитационного моделирования уровень детализации исследуемого объекта позволяет достичь высокой точности результатов решения указанной задачи на этапах проектирования и эксплуатации складской системы [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Back W., Hwang H., Lee M. Clustering algorithms for order picking in an automated storage and retrieval system // International Journal of Production Research. – 1998. – N 26(2). – pp. 189-201.
2. Kefi M., Korbaa O., Ghedira K. Container Handling using multi-agent architecture // Lecture Notes in Computer Science. – 2007. – N 4496. – pp. 685-693.
3. Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // Exponenta PRO. – 2004. – № 3-4 (7-8). – с. 38-47.
4. Гаджинский А.М. Современный склад. Организация, управление, технологии и логистика: учебно-практическое пособие. – М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2005. – 176 с.

5. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 256 с., ил.
6. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с., ил.
7. Маликов О.Б. Склады и грузовые терминалы: справочник. – СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2005. – 560 с.
8. Пилипчук С.Ф. Логистика предприятия. Проектирование складской логистической системы предприятия: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 231 с.
9. Пилипчук С.Ф., Радаев А.Е. Моделирование складских логистических процессов // Логистика и управление цепями поставок: перспективы в России и Германии: Сборник статей V германо-российской конференции по логистике. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – с. 197-208.
10. Радаев А.Е., Кобзев В.В. Методика обоснования структуры парка оборудования для складского комплекса промышленного предприятия на основе имитационного моделирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 1(114). – с. 98-104.

УДК 69.07

Б.А. Смольников, В.А. Леонтьев

ЭЛЕМЕНТЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ ОРБИТАЛЬНЫХ ТРОСОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ



Борис Александрович Смольников, к.ф.-м.н., профессор. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ). Россия, Санкт-Петербург.
Тел.: (812)535-3714, E-mail: smolnikovba@yandex.ru



Виктор Анатольевич Леонтьев, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник. Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК). Россия, Санкт-Петербург.
Тел.: (812)297-3058, E-mail: vleont@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы развертывания на круговой околоземной орбите крупногабаритной тросовой (сетчатой) конструкции, основным строительным элементом которой являются гравитационные диполи (ГД). Предложены и проанализированы два способа раскрытия на орбите одиночного ГД. Результаты численного моделирования подтвердили эффективность предложенных способов развертывания и адекватность их компьютерных моделей.

Ключевые слова: Орбитальный монтаж, тросовый элемент, орбитальная тросовая конструкция (ОТК), гравитационный диполь (ГД), спутник-носитель (С-Н), микротяжесть, орбитальная корзина, моделирование.

B.A.Smolnikov, V.A.Leontev

ELEMENTS OF STRUCTURAL MECHANICS FOR THE TETHERED SATELLITE SYSTEMS

Dr. Prof. Boris A. Smolnikov[1], e-mail: smolnikovba@yandex.ru;
Dr. Victor A. Leontev[2], e-mail: vleont@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
[2]Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, Russia

Abstract

The paper deals with the deployment of large tethered (mesh) structure in a circular Earth orbit. Fundamental building blocks of this structure are the gravitational dipoles (GD). Orbital deployment of a single GD is proposed and ana-

lyzed in two ways. Results of the numerical simulations confirmed the effectiveness of the proposed deployment methods and demonstrated the adequacy of their computer models.

Key words: Orbital deployment, tethered element, tethered satellite system (TSS), gravitational dipole (GD), satellite carrier (SC), micro-gravity, orbital basket, computer simulation.

Строительная механика сооружений – одна из древнейших дисциплин в истории цивилизации, причем, начиная от египетских пирамид и до XX века она носила по преимуществу статический характер (исключая мостовые сооружения) и поэтому довольствовалась статическим анализом конструкций. Однако уже в XX веке, по мере освоения человеком новых пространств (морских, воздушных и космических), ей пришлось все больше прибегать к методам динамического анализа конструкций, расширяя как круг актуальных задач, так и арсенал новых подходов к их постановке и решению. Наконец, XXI век фактически открывает проблему строительства крупногабаритных орбитальных сооружений, предназначенных для стационарной жизни и деятельности больших контингентов специалистов различного профиля. При этом естественно возникает вопрос о выборе строительных материалов и конструктивных элементов, пригодных для этой совершенно новой среды обитания и имеющих сравнительно небольшую массу. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют тросово-вантовые элементы, изготовленные из композитных и полимерных материалов, обладающих высокими прочностными характеристиками [1-6].

Широкое использование подобных тросовых элементов представляется совершенно необходимым условием для строительства на околоземной орбите крупногабаритных жилых, производственных и исследовательских комплексов, габариты которых исчисляются размерами от сотен метров до десятков километров. Для обеспечения необходимой жесткости подобных сетчатых сооружений требуется создавать в тросовых элементах определенную силу их натяжения посредством использования гравитационных, центробежных и электромагнитных сил. Для кратковременного натяжения тросов в процессе их раскрытия и монтажа можно использовать также тяговые реактивные модули.

Сферы практического применения орбитальных тросовых конструкций (ОТК) чрезвычайно разнообразны. Это, например, многомодульные жилые и производственные комплексы, соединенные тросами и обладающие вполне ощутимой микротяжестью. Это разномасштабные причальные сооружения для космических аппаратов и спутников, а также складские помещения. Это всевозможные энергодобывающие установки (на солнечных батареях). Это орбитальные сельскохозяйственные парники с гидропоникой для выращивания культурных растений. Построенная на основе

ОТК конструкция в форме цилиндрической «орбитальной корзины» (рис. 1) может использоваться в качестве орбитального мусоросборника и даже мусороперерабо тчика, что станет крайне актуальным делом уже в ближайшие годы. Наконец, подобная орбитальная корзина может служить научным полигоном для проведения уникальных экспериментов в самых разных областях знаний и технологий. Большим достоинством предлагаемой ОТК является возможность ее расширения во всех направлениях путем присоединения к ней различных тросовых конструкций и модулей.

При решении задач орбитального развертывания ОТК возникают два класса научно-технических и технологических проблем:

а) раскрытие и орбитальный монтаж тросовых и сетчатых элементов;

б) стабилизация и управление собранной ОТК при ее эксплуатации.

Ограничиваясь здесь только первой проблемой, рассмотрим ее основной строительный элемент − гравитационный диполь (ГД), представляющий собой в развернутом состоянии совокупность двух модулей, соединенных длинным тросом, вытянутым вдоль местной вертикали, когда центр масс ГД равномерно движется по круговой орбите со скоростью V_c (см. рис. 1, а).

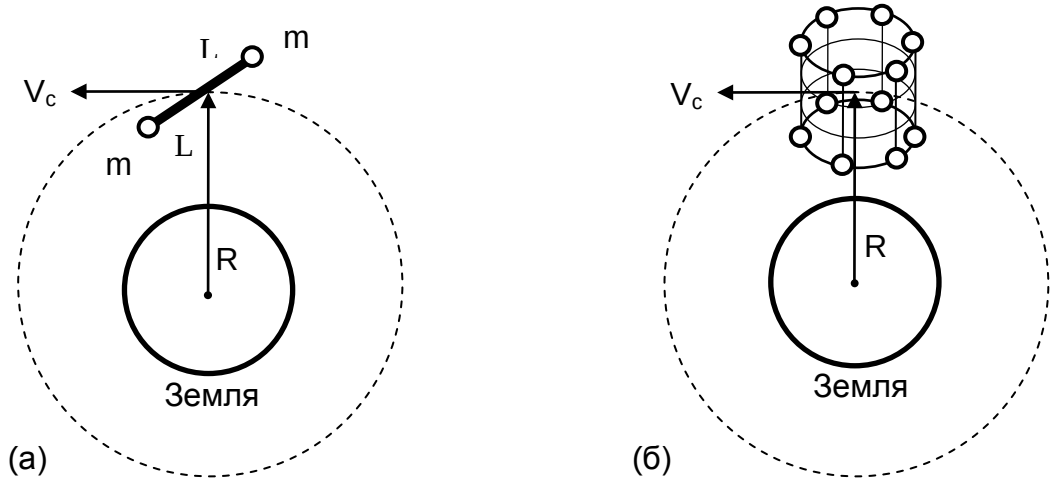


Рис. 1. (а) одиночный ГД; (б) система ГД на орбите («корзина»)

Уже этот простейший тросовый элемент представляет собой большой практический интерес, т.к. он позволяет создать в концевых модулях микротяжесть для обитающих там людей, достигающую 2−3 % от наземной при длине троса L около 100 км. Однако гораздо больший интерес представляет использование ГД в качестве типового элемента при построении крупногабаритных ОТК. Так, разворачивая с помощью первого ГД целый ряд аналогичных ГД и образуя из них, посредством кольцевых тросов, круговую орбитальную корзину (рис. 1, б), можно построить целый орбитальный цилиндрический остов, пригодный для разнообразных целей. Для придания этому остову поперечной жесткости, по связующим

кольцам можно пропустить постоянный ток, для чего их целесообразно сделать сверхпроводящими. Тем самым остов приобретет желаемую жесткость как в продольном направлении (за счет приливных гравитационных сил, действующих на каждый ГД), так и в поперечном (за счет электромагнитного распора токовых колец). Это позволит перейти к решению задач по управлению как вращательным, так и поступательным движением остова в любом нужном направлении. Здесь возникает целый круг задач, связанных с гашением возникающих колебаний сетчатых конструкций, а также с выбором оптимальных режимов управления ими.

Первым шагом в построении ОТК является, очевидно, раскрытие одиночного ГД с борта специализированного спутника-носителя (С-Н), движущегося по круговой околоземной орбите. Здесь могут быть использованы два способа развертывания ГД:

1) баллистический 3х-импульсный маневр;
2) управляемое вытягивание троса из корпуса спутника посредством тягового реактивного модуля В на нижнем конце троса.

В первом режиме концевому грузу В троса сообщается дозированная начальная скорость V_0 , после чего он в баллистическом полете вытягивает за собой трос из спутника до тех пор, пока не достигнет целевой точки, расположенной на текущем радиус-векторе С-Н, т.е. на его местной вертикали. В этой точке на грузе В включается тяговый реактивный двигатель, сообщающий ему тормозной импульс Δv_B, а верхнему концевому грузу А сообщается необходимая для создания ГД орбитальная скорость Δv_A. В результате образуется изолированный ГД (АВ), совершающий предписанное ему орбитальное движение, при котором оба его груза (модуля) располагаются на одной местной вертикали.

Во втором режиме процесс выпуска груза происходит под действием непрерывной малой тяги концевого двигателя на модуле В, а задача управления состоит в выборе оптимальной величины и направления тяги.

Полностью развернутый ГД является своеобразным «кирпичом» будущей орбитальной корзины, причем отдельные тросы можно выпускать на предписанную орбиту со спутника либо независимо друг от друга, либо в виде некоторого пучка тросов с последующим их разделением и образованием цилиндрической сетчатой конструкции.

Рассмотрим подробнее первый режим развертывания ГД. Свяжем со спутником-носителем орбитальную систему координат OXYZ, начало которой находится в центре масс С-Н и движется равномерно по круговой орбите радиуса R, причем ось OY всегда направлена к центру Земли, а ось OX – вдоль вектора орбитальной скорости С-Н. Угловая скорость ω вращения осей XY очевидно есть

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{R}}, \qquad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести на расстоянии R от центра Земли. Тогда линеаризованные уравнения движения точечного груза B с массой m_B (без учета массы троса), выброшенного с носителя с начальной относительной скоростью V_0 под углом θ к оси OY, имеют следующий вид [1]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - 2\omega\dot{y} &= 0 \\ \ddot{y} + 2\omega\dot{x} - 3\omega^2 y &= 0 \end{aligned}, \qquad (2)$$

Эти уравнения, при бросании тела из начала координат с начальной скоростью V_0 , направленной под углом θ к оси местной вертикали Y (к центру Земли), имеют решение

$$\begin{aligned} x(t) &= (3t - \frac{4}{\omega}\sin\omega t)V_0\sin\theta + \frac{2}{\omega}(1-\cos\omega t)V_0\cos\theta \\ y(t) &= \frac{2}{\omega}(1-\cos\omega t)V_0\sin\theta + \frac{1}{\omega}\sin\omega t V_0\cos\theta \end{aligned}. \qquad (3)$$

Построим траектории модуля B, бросаемого под различными углами θ к местной вертикали с относительной начальной скоростью, например, V_0 = 10 *м/сек*. Для расчетов применялся высокоточный явный метод численного интегрирования (метод Дорманда-Принса, имеющий 8-й порядок точности).

На рис. 2 представлены траектории тела B при направлениях его бросания как вдоль, так и против местной вертикали. Это эллипсы с осями, направленными вдоль оси OX (большая ось) и OY (малая ось), и периодами, равными периоду обращения C-H. Далее на рисунке 3 показана траектория при угле бросания 45º. Это петлевая спираль, раскручивающаяся вперед относительно спутника-носителя, движущегося по круговой орбите высотой 400 км с периодом обращения $T_{орб}$ = 5548 сек ≈ 1.5 часа.

Учитывая общий характер таких траекторий, можно поставить вопрос о наиболее выгодном переходе модуля B в некоторую точку оси OY, где $x_B = 0$, а $y_B = L$. Вблизи этой точки к модулю B может быть приложен корректирующий импульс тяги, обеспечивающий орбитальную скорость данного модуля, необходимую для создания ГД длиной L. Одновременно верхний модуль A должен отделиться от корпуса C-H, получив необходимую для этого орбитальную скорость.

В результате ГД начинает совершать предписанное ему движение, имея угловую скорость Ω, соответствующую величине радиус-вектора ρ_c его центра масс, определяемой соотношением масс модулей m_A и m_B. Очевидно, что $\rho_c < R$, следовательно, согласно формуле (1), $\Omega > \omega$.

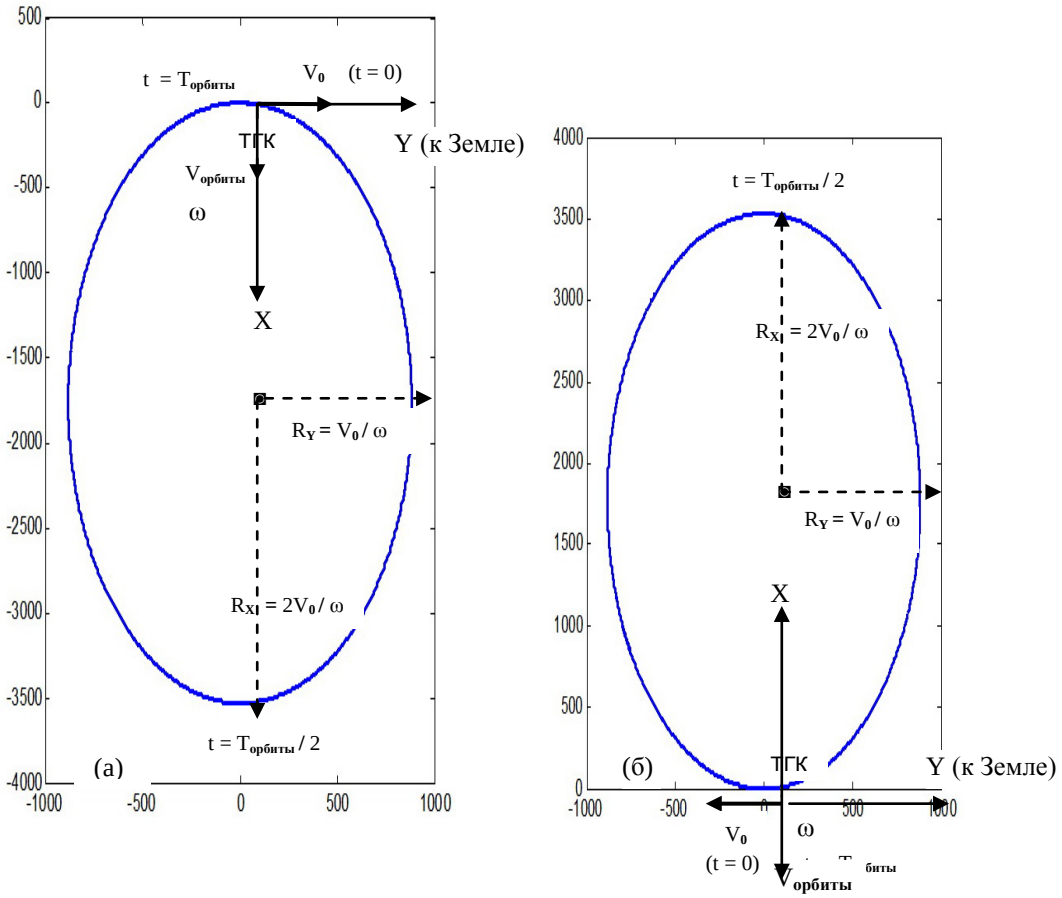


Рис. 2. (а) угол бросания θ = 0º; (б) угол бросания θ = 180º.

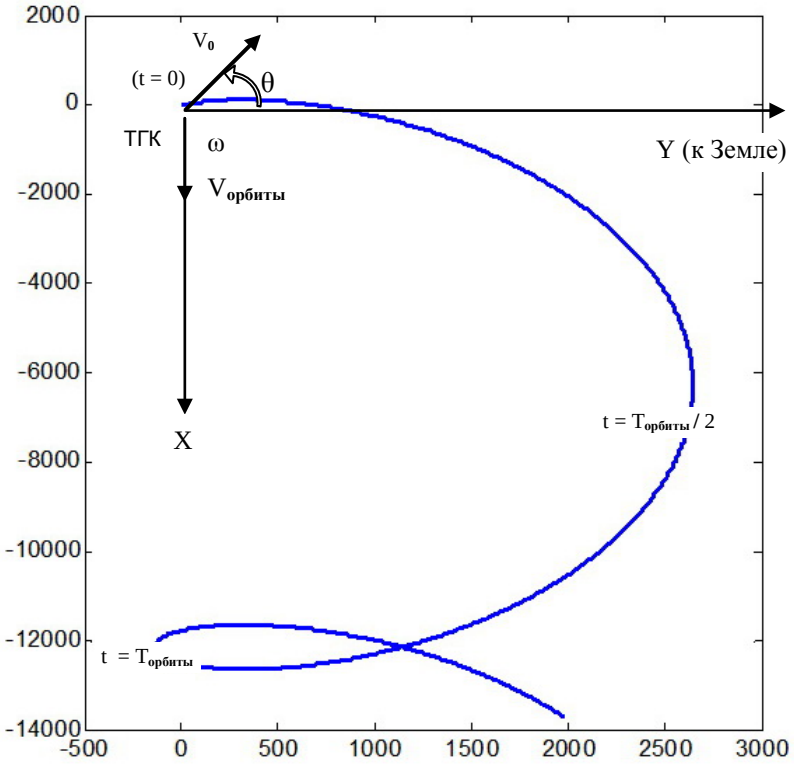


Рис. 3. Угол бросания θ = 45º.

Поэтому орбитальная скорость модуля А, равная ΩR, будет превышать орбитальную скорость С-Н, равную ωR, вследствие чего ГД начнет обгонять С-Н, уходя от него в направлении оси OX и оставаясь при этом в положении относительного равновесия. При этом орбитальная скорость верхнего модуля будет равна ΩR, а нижнего Ω(R-L). Положение центра масс ГД нетрудно найти из условия его равновесия под действием суммарной гравитационной силы P_A+P_B (где $P_A=\mu m_A/R^2$, $P_A=\mu m_B/(R-L)^2$, $\mu = \gamma M$ – гравитационный параметр Земли) и центробежной силы, т.е. из равенства

$$P_A + P_B = \Omega^2 \rho_c (m_A + m_B) \quad . \tag{4}$$

Что касается оптимизации рассмотренного 3-х импульсного перехода, то за критерий его качества можно принять либо величину суммарного прироста скоростей верхнего и нижнего модулей

$$J_c = V_o + \Delta v_A + \Delta v_B \quad , \tag{5}$$

либо дальность L, которая определит общую длину ГД.

Рассмотрим здесь второй критерий. Переходя к безразмерному времени, пропорциональному угловому перемещению $\varphi = \omega t$, пройденному спутником-носителем по его орбите за время маневра раскрытия ГД, выразим координаты модуля В в момент его выхода на местную вертикаль в точке $x(\varphi) = 0$, $y(\varphi) = L$:

$$\begin{aligned} x(\varphi) &= \frac{V_0}{\omega}\left[(3\varphi - 4\sin\varphi)\sin\theta + 2(1-\cos\varphi)\cos\theta\right] = 0 \\ y(\varphi) &= \frac{V_0}{\omega}\left[2(1-\cos\varphi)\sin\theta + \sin\varphi\cos\theta\right] = L \end{aligned} \quad . \tag{6}$$

Далее, исключая из второго уравнения угол бросания θ, найденный из первого уравнения

$$\theta = arctg\frac{2(1-\cos\varphi)}{(4\sin\varphi - 3\varphi)} \quad , \tag{7}$$

можно получить следующее выражение для дальности бросания L:

$$L(\varphi) = \frac{V_0}{\omega}\cdot\frac{8(1-\cos\varphi) - 3\varphi\sin\varphi}{\sqrt{4(1-\cos\varphi)^2 + (4\sin\varphi - 3\varphi)^2}} \quad . \tag{8}$$

Взяв производную от $L(\varphi)$ по φ и приравняв ее нулю, получаем, что дальность достигает максимума, когда величина φ удовлетворяет следующему трансцендентному уравнению:

$$180\varphi + (27\varphi^3 - 144\varphi)\cos\varphi - 36\varphi\cos 2\varphi - (173 + 72\varphi^2)\sin\varphi + (100 - 18\varphi^2)\sin 2\varphi - 9\sin 3\varphi = 0 \tag{9}$$

Решая это уравнение численно, находим его корень $\varphi = \omega T_L = 2.10580 \approx 2\pi/3$, после чего определяем из (7) угол θ_m, обеспечивающий максимальную дальность L_{max}:

$$\theta_m = arctg(-1.049839648646) = 133.607^\circ \approx \frac{3}{4}\pi \quad . \tag{10}$$

При этом время бросания на максимальную дальность не зависит от величины относительной скорости броска V_0 и равно $T_L = 2.1058/\omega =$

1859.5 *сек* ≈ 31 *мин* (при угловой скорости на высоте 400 км, равной ω = 0. 0011324366 1/*сек*).

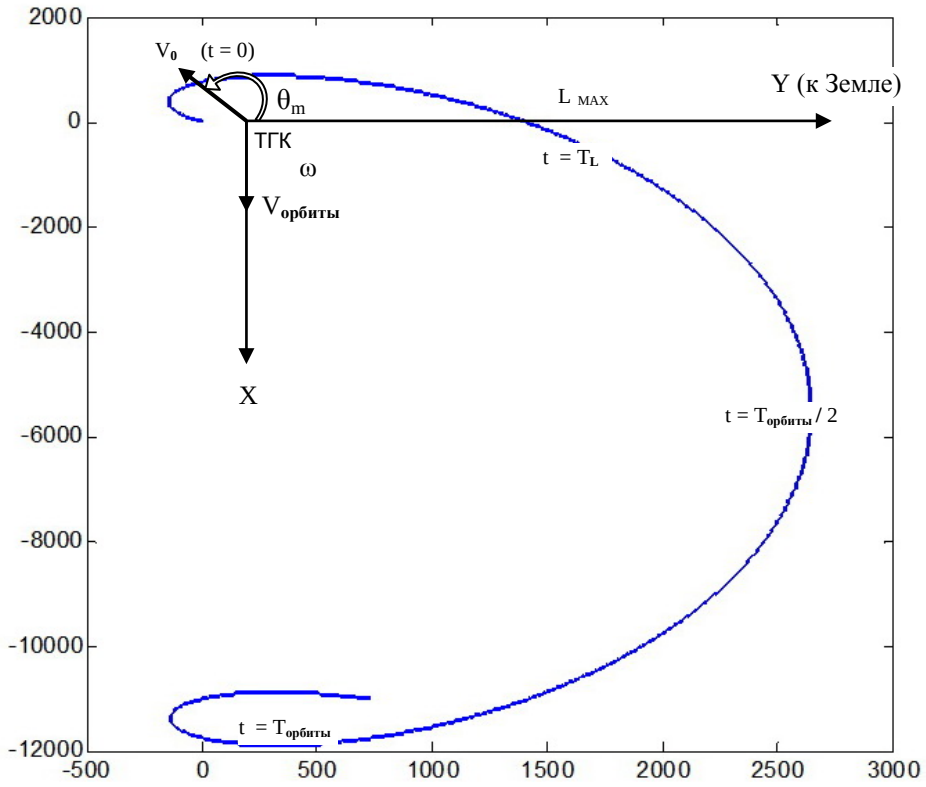


Рис. 4. Угол бросания $\theta_m = 133.607^o$.

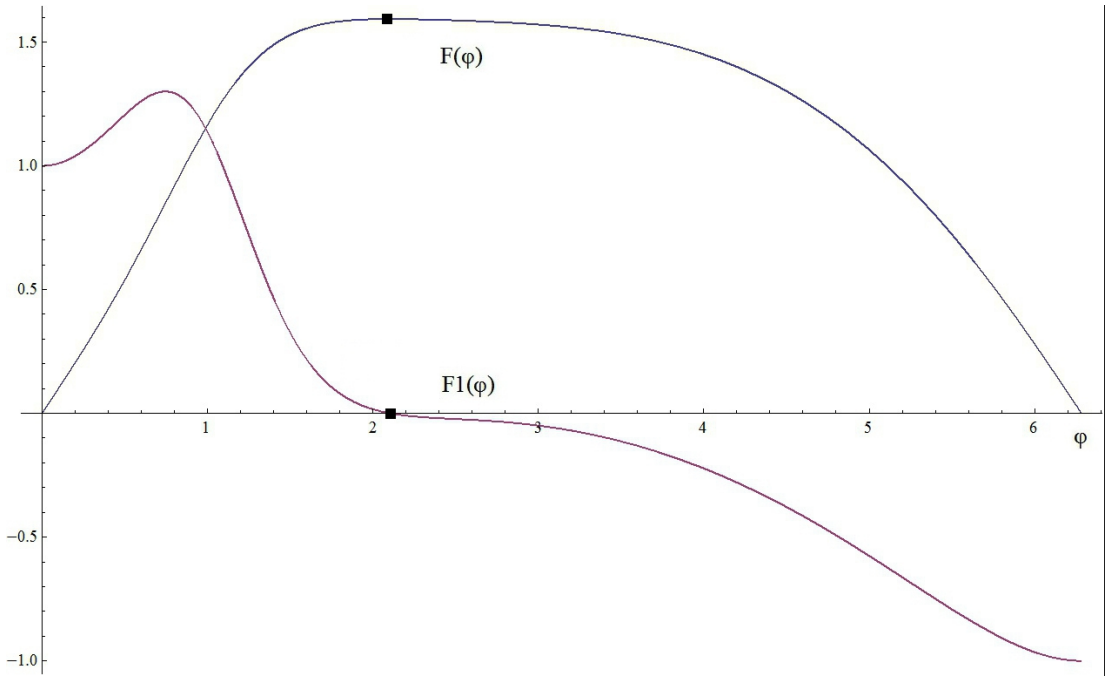


Рис. 5. Графики безразмерной функции дальности и ее производной.

Напротив, максимальная дальность L_{max} зависит как от ω, так и от V_0:

$$L_{\max} = 1.59317713\frac{V_0}{\omega} \quad . \tag{11}$$

При V_0 = 10 *м/сек,* ω = 0. 0011324366 1/*сек* и при оптимальном угле (10) получаем

$$L_{\max} = 14068.58 \ м \quad . \tag{12}$$

Форма траектории бросания концевого модуля B на максимальную дальность L_{max} показана на Рис.4, а на Рис. 5 представлены графические зависимости безразмерной функции дальности $F(\varphi) = L(\varphi)\cdot(\omega/V_0)$ и ее производной $dF/d\varphi = F1(\varphi)$. Эти функции определяются формулой (8), где орбитальный угол φ измеряется в радианах.

Из этих графиков видно, что максимальное удаление модуля B вдоль местной вертикали от C-H достигается при $\varphi = 2.1058 \approx 2\pi/3$, причем вблизи этого экстремума (в диапазоне $1.8 \le \varphi \le 3$) безразмерная дальность $F(\varphi)$ изменяется весьма незначительно. При этом отвечающий данному диапазону угол бросания θ **с**огласно (7) лежит в пределах $122^\circ \le \theta \le 155^\circ$. Это позволяет в указанном диапазоне углов оптимизировать процесс раскрытия ГД по какому-либо дополнительному критерию качества, например по (5).

Обратимся теперь ко второму режиму разворачивания ГД, основанному на использовании непрерывной малой тяги, приложенной к модулю B. В этом режиме очень важную роль играет учет массы и упруго-диссипативных свойств вытягиваемого троса, так как эти факторы могут оказывать большое влияние на весь процесс раскрытия ГД.

Для расчета и моделирования тяговых режимов выпуска и развертывания троса с концевым модулем B была построена подробная расчетная схема и написана компьютерная программа численного моделирования, применяющая специальный метод интегрирования, представленный в работе [7]. Для наблюдения и оценки всех этапов процесса движения троса была написана специальная программа визуализации на языке Fortran-90, на основе графической библиотеки OpenGL в операционной системе Windows. Программа использует данные, сбрасываемые основной программой моделирования в выходной файл, в качестве своего входного файла. Координаты отдельных точек троса (сочленений дискретной модели троса, разработанной на основе диссертационных материалов одного из авторов – см. например, его работу [8]) сглаживаются с помощью неравномерных сплайнов NURBS (Non Uniform Rational B-Splines), имеющихся в OpenGL.

Рабочее окно программы визуализации можно видеть на рисунках 6 и 7, где показаны ГД с тросом, выпускаемым в сторону Земли (ось OY) и система координат XYZ, связанная с C-H. Плоскость орбиты показана как сверху (со стороны оси Z), так и в поперечном ракурсе (со стороны оси X). В этом окне отображаются также значения момента времени, координат модуля B и величины силы натяжения троса и указан угол выброса θ.

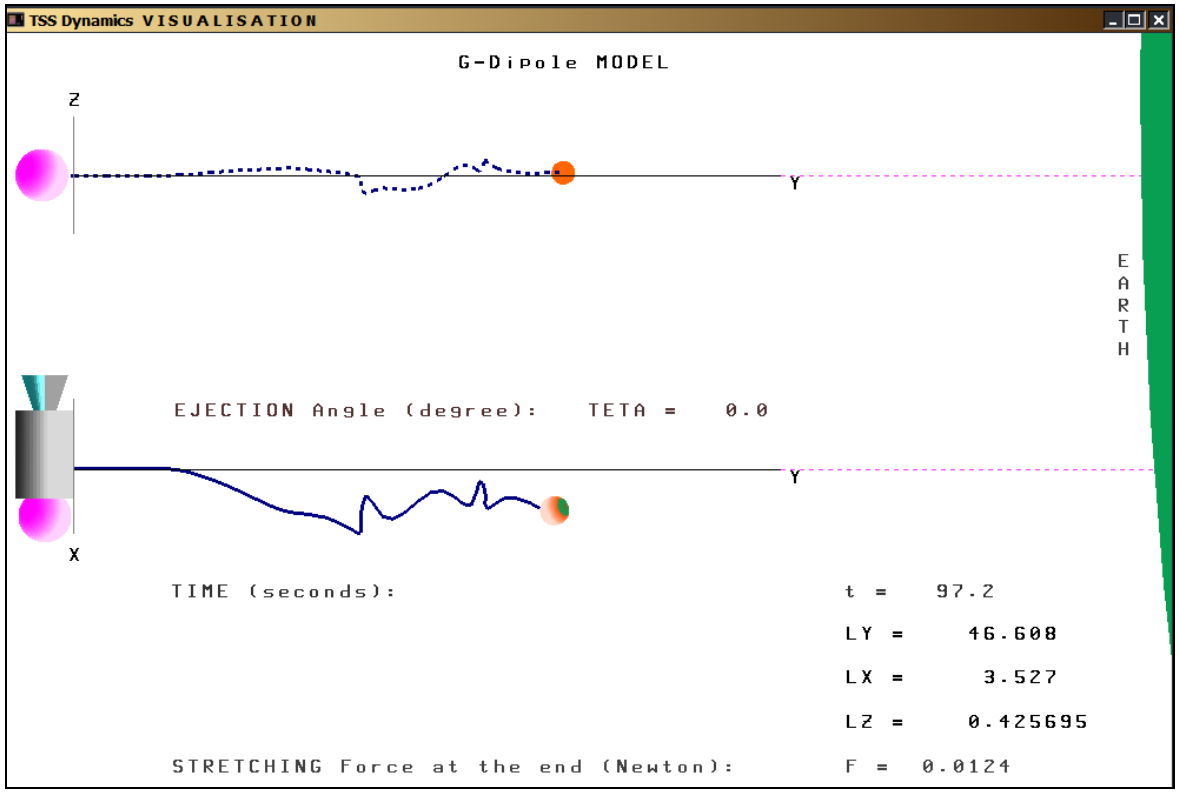


Рис. 6. Выброс модуля В при отсутствии силы притормаживания троса.

Основной целью компьютерных экспериментов было определение оптимального режима выпуска троса и его остановки с помощью силы тяги на концевом модуле, а также изучение влияния силы притормаживания троса в выпускном канале на процесс развертывания. Число разбиений троса на основные участки было выбрано равным 30, общее число дискретных участков в модели троса равнялось 90, а общее число степеней подвижности (полная размерность дискретной модели) была равна 373. Масса элементов троса (материал троса – кевлар), продольная и угловые жесткости (изгибные и крутильные) учитывались во всех элементах модели троса. При этом масса С-Н была принята равной 7000 кг, а модуля В - 100 кг.

Рис. 6 показывает случай выброса модуля В с тросом при отсутствии силы притормаживания троса в выпускном канале С-Н. Видно, что сила притормаживания обязательно должна присутствовать, иначе происходит смятие троса и образование петель, ведущих к его последующему обрыву. А при притормаживании троса его форма становится гладкой и стабильной.

На рис. 7 показан найденный в результате проведенных компьютерных экспериментов наилучший режим развертывания и остановки троса. Вначале делается выброс модуля В с тросом под малым углом $\theta = 3^{\circ}$ к местной вертикали Y. Сила выброса (реактивная сила тяги на модуле В), рав-

ная 30 Н, действует в течение 15 секунд, а сила притормаживания в канале выпуска равна 1 Н. После 15 секунд работы сила тяги отключается, что обеспечивает дальнейшее движение троса с модулем В по инерции, плавно и без возбуждения его колебаний, вплоть до достижения предельной длины L_{max}.

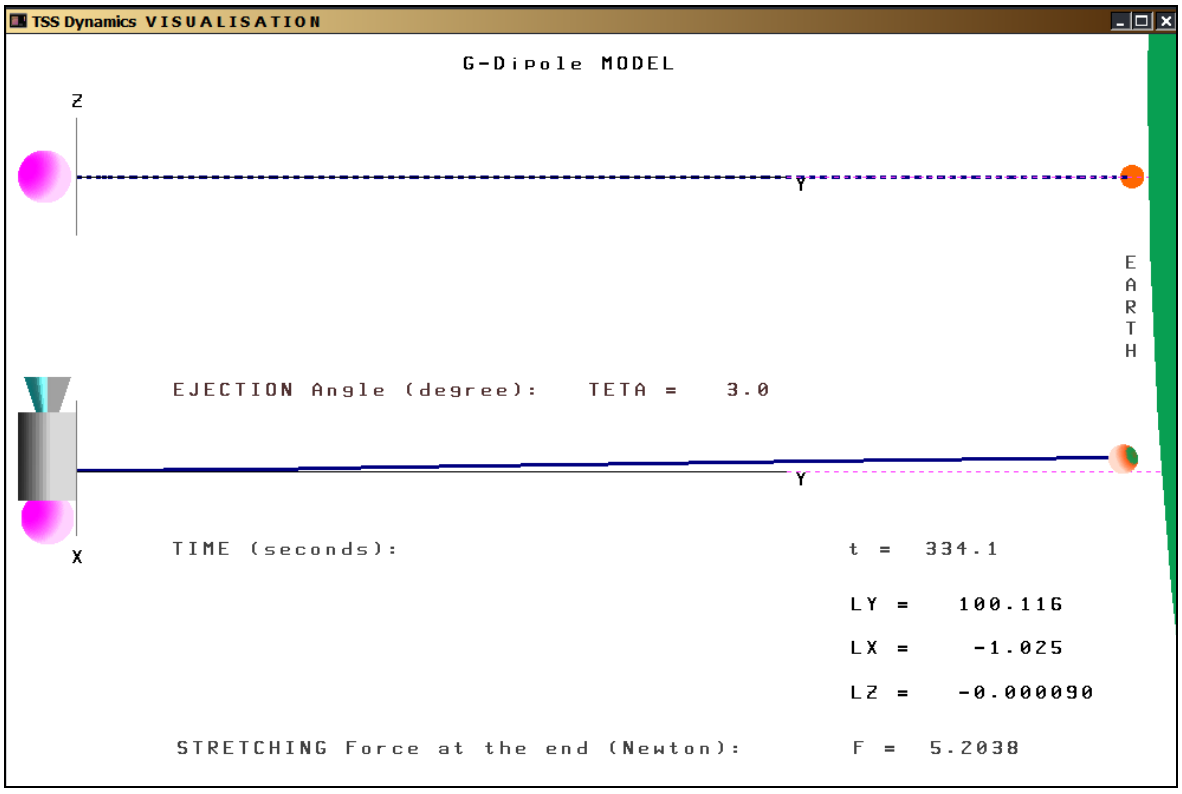


Рис. 7. Развертывание и останов модуля В с тросом по «AUTO-TETA».

Заметим, что если затем не применить режим торможения модуля В с помощью силы тяги, то начнется уход троса от местной вертикали Y в направлении оси X. Авторам удалось показать, что возможно обеспечить быструю остановку модуля В с тросом вблизи целевой точки с помощью предложенного режима управления вектором постоянной тяги величиной 30 Н. На терминальном этапе она включается и остается постоянной, изменяя лишь угол своего наклона $\theta_{тяги}$ к оси Y согласно следующему алгоритму «AUTO-TETA»:

$$\theta_{тяги} = 45^{\circ} \frac{D_X}{D_{X(T0)}} sign(V_X) \quad . \qquad (13)$$

Здесь V_X – проекция скорости движения модуля В на ось X; D_X – расстояние от точки В до оси Y, которое необходимо измерять посредством датчиков, а $D_{X(T0)}$ – его значение в момент T_0 включения тормозной тяги. Алгоритм (13) задает как проекцию силы тяги, уменьшающую скорость V_X, так и проекцию, натягивающую трос. В момент T_0 расстояние $D_X = D_{X(T0)}$, после чего угол $\theta_{тяги}$ = уменьшается от 45º до 0º при приближении модуля В к оси Y, когда сила тяги лишь натягивает трос. Практика моде-

лирования показала высокую эффективность предложенного закона управления остановкой выпуска троса, так как модуль В с тросом останавливается быстро, и без возбуждения колебаний.

После этого необходимо отключить силу тяги и одновременно с этим отделить модуль А от корпуса С-Н со скоростью Δv_A. В результате ГД перейдет в штатный режим орбитального движения, в котором натяжение троса определяется разностью сил земного притяжения модулей А и В и их центробежных сил инерции. При наличии неточностей в задании орбитальных скоростей Δv_A и Δv_B, развернутый ГД может совершать остаточные малые маятниковые колебания вокруг осей X и Z. Однако со временем эти колебания должны затухнуть благодаря наличию внутренней диссипации энергии в материале троса (см. например, работы [9-10]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. ─ М.: Наука. 1990. ─ 336 с.
2. Алпатов А.П., Белецкий В.В., Драновский В.И. и др. Динамика космических систем с тросовыми и шарнирными соединениями. ─ Москва-Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2007. ─ 560 с.
3. Иванов В.А. Тросовые системы в космосе. // Авиация и космонавтика, 1984. № 5, С. 43─44.
4. Иванов В.А., Ситарский Ю.С. Динамика полета системы гибко связанных космических объектов. ─ М.: Машиностроение. 1986. ─ 246 с.
5. Левин Е.М. О развертывании протяженной связки двух тел на орбите. // Космические исследования, 1983, Т. XXI, № 1, С. 678─688.
6. Поляков Г.Г. Радиальная система связанных спутников. // Космические исследования, 1981, Т. IX, № 3, С. 467─470.
7. V.A. Leontyev. Direct time integration algorithm with controllable numerical dissipation for structural dynamics: Two-step Lambda method. // *Applied Numerical Mathematics*, 2010, Vol. 60, № 3, pp. 277-292. (Published by Elsevier B.V., Amsterdam).
8. Леонтьев В.А. Оптимальная дискретизация распределенной упругости в расчетных моделях звеньев манипулятора. // Материалы 1-й научно-технической конференции «Роботы и манипуляторы в экстремальных условиях» - СПб.: СПбДНТП,1992. - С. 100-106.
9. Смольников Б.А., Леонтьев В.А. Диссипативная динамика орбитальных тросовых систем/Dissipative dynamics of tethered satellite systems (TSS). // Материалы 7-й международной конференции «Планетоходы, космическая робототехника и наземные роверы». -–СПб., ЛЕНЭКСПО, 2010, с. 48-49.
10. Smolnikov B.A., Leontyev V.A. Evolutionary dynamics of orbital objects. // European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS 2011), Saint Petersburg, Russia, 4-8 July 2011. EUCASS CD book of papers 2011, Symposium 4, № 24.

УДК 378.1

А.В. Стукач

РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИВОДА В КУРСОВЫХ И ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТАХ ПО СТРОИТЕЛЬНЫМ МАШИНАМ



Александр Васильевич Стукач, к.т.н., доцент
Санкт – Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Телефон:. 89045529715, E-mail: alstnevaspb@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы разработки обучающей программы модульного типа, предназначенной для расчета элементов привода в курсовых и дипломных проектах. Приводятся общие принципы работы с программой и делается анализ баланса между самостоятельным принятием решений и автоматизированным выбором необходимых параметров. Указывается, что использование специализированных обучающих программ способствует более быстрому и качественному приобретению студентами новых знаний, умений и навыков.

Ключевые слова: элементы привода, расчет, программа, обучение.

A.V. Stukach

CALCULATION OF CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF A DRIVE IN THE COURSE AND DIPLOMA PROJECTS FOR CONSTRUCTION MACHINERY

Alexander V. Stukach,
St.Petersburg State Polytechnical University, Russia
e-mail: alstnevaspb@mail.ru

Abstract

Addressed the development of training programmes of the modular type, intended for calculation of elements of a drive in the course and diploma projects. Contains the General principles of work with the program and the analysis of the balance between independent decision-making and the automated selection of the required parameters. Indicates that the use of the specialized

training programs contributes to more rapid and high-quality students acquire new knowledge, abilities and skills.

Key words: drive components, calculation, program, training

Появление третьего поколения государственных образовательных стандартов регламентирующих процесс подготовки специалистов в высших учебных заведениях сделало актуальным вопрос совершенствования учебного процесса. Двухуровневая система подготовки специалистов технического профиля предъявляет новые требования к организации общего направления в образовательном процессе. В соответствии с принятой стратегией [1] в основу обучения бакалавров положена фундаментальность, проектный подход, научно-исследовательская работа и связь с практикой.

Особую озабоченность преподавателей вызывает проектный подход, требующий от студентов твердых знаний предмета и быстрого принятий необходимых решений. Выполняя проектные расчеты, студенты определяют геометрические размеры элементов привода. Затем осуществляется проверка. Хорошо успевающие студенты проверочные расчеты выполняют в среде SolidWorks, Компас, и ряде других программ. Особо следует отметить систему автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства - комплекс АРМ WinMachine [2,3]. В его состав включены графические средства для создания плоских чертежей и трехмерных моделей, оформления конструкторской документации, полный комплекс инженерных расчетов, инструменты конечно-элементного анализа, средства создания и оформления технологических процессов, модули документооборота и администрирования, а также различные базы данных.

Использование прикладных программ с мощными ресурсами визуализации позволяет облегчить восприятие студентами сложных физических процессов. Однако, как указано в работе [4], подмена мыслительной деятельности студентов компьютерными программами может дать обратный эффект. Кроме того, доступность для личного пользования, выше названных программ, связана с этической стороной, так как доступными для физических лиц являются только не лицензионные версии.

В настоящее время можно выделить более доступный программный продукт, который студенты могут использовать для расчета элементов привода созданный в г. Тольятти [5] и носит название: DM-Monster 8.x Она предназначена для расчёта курсовых по деталям машин и получения полной ПЗ и чертежей в КОМПАСе или AutoCADe. Титул программы показан на рис. 1. Однако она, как и все предыдущие программы представляет собой «черный ящик», в который спрятаны все вычисления, а пользователю предлагаются результаты в виде табличных данных.

Для обучения студентов целесообразно использовать такие программные продукты, которые формализуя процесс математического вычисления, позволяют студенту понять и запомнить основополагающие формулы, по которым производятся вычисления.



Рис. 1. Программа, созданная И.Н. Ноженко

На протяжении длительного времени очень трудоемкими, содержащими множество расчетов и большой объем графической части считаются курсовые проекты по дисциплине: «Строительные машины» и ряду других технических дисциплин. Для оптимизации процесса обучения широко используются персональные компьютеры, которые используются студентами чаще всего для оформления расчетов, выполненных с применением известных программ «Matcad» и «Microsoft Excel». Поэтому преподавателям приходится самостоятельно, собственными силами, создавать жизненно необходимые учебные программы. Существенное отличие учебных программ от профессиональных заключается в том, что учебная программа позволяет контролировать результаты вычислений на любом этапе, что позволяет своевременно устранять имеющиеся ошибки. Проектирование студентами элементов привода силовых устройств с использованием вычислительной техники существенно уменьшает трудоемкость расчетов, позволяет получать конструкции, оптимальные по габаритным размерам, массе и другим показателям, обеспечивает точность вычислений. Роль компьютера возрастает в связи с внедрением в машиностроение стандартных узлов и деталей с развитием модульного принципа конструирования. Модульный принцип лег в основу алгоритма и методики расчетов с использованием ниже рассматриваемого материала, что и является инновационным подходом в разработке обучающих программ.

Выполнение курсовых проектов способствует закреплению и углублению знаний, в частности курсовой проект по СДМ базируется на знаниях полученных при изучении общетехнических дисциплин: теоретической механики, теории машин и механизмов, сопротивления материалов, деталей машин, технологии металлов, черчения и пр.

Тематика курсового проектирования имеет вид комплексной инженерной задачи, включающей кинематические и силовые расчеты, выбор материалов и расчеты на прочность, вопросы конструирования и выполнения конструкторской документации в виде габаритных, сборочных и рабочих чертежей, а также составления спецификации.

Правильным подходом применения вычислительной техники при выполнении курсовых проектов следует считать такую организацию учебного процесса и такое построение методики расчета, которые способствуют закреплению логики расчета и физического смысла каждого параметра, входящего в расчетные формулы. Например, проектируя двух- или трехступенчатый цилиндрический редуктор с обеспечением условия равнопрочности деталей, с минимумом суммарного межосевого расстояния и другими параметрами, характеризующими оптимальность конструкции, студент не менее двух-трех раз должен выполнить расчеты по каждой из ступеней передачи, несколько раз за время проектирования выполнить типовые расчеты, связанные с выбором подшипников, расчетом валов и т.д. В подобных случаях применение обучающих программ не только экономит время студента при выполнении указанных расчетов, но и позволяет существенно расширить вариантность выбора материалов, параметров, компоновочных схем и провести более глубокий их анализ. Но к использованию таких программных продуктов целесообразно допускать только тех студентов, которые выполнили от начало и до конца обычный расчет по учебно-справочной литературе. Такой расчет способствует закреплению теоретических знаний, полученных из курса деталей машин, развивает навыки пользования справочной литературой, обеспечивает логический подход к решению инженерных задач.

Разделяя мнение автора статьи [6], при подготовке обучающей программы исходили из принципа: «Делай как другие, делай лучше их». Для этого в основу программного продукта закладывали литературные источник дата издания, которых не превышает более пяти лет. В основу описываемой ниже программы, положены следующие основные источники [7,8,9,10,11,12].

При использовании обучающих программ роль проектировщика, как и прежде, остается ведущей. Например, если расчет зубчатых передач редуктора выполнен на компьютере, но модуль передачи, определенный в проектировочном расчете, не обеспечивает сопротивления усталости по изгибным или контактным напряжениям в проверочном расчете, то именно студент-проектировщик должен принять решение, каким образом обеспечить условие прочности, не снижая значения других параметров, влияющих на оптимизацию конструкции редуктора в целом. Для машины невозможно создать

алгоритм, который учитывал бы все факторы, влияющие на выбор того или иного решения.

Учебная программа расчета элементов механического привода состоит из нескольких модулей, работающих самостоятельно. Рабочий стол программы представлен на рис. 2.

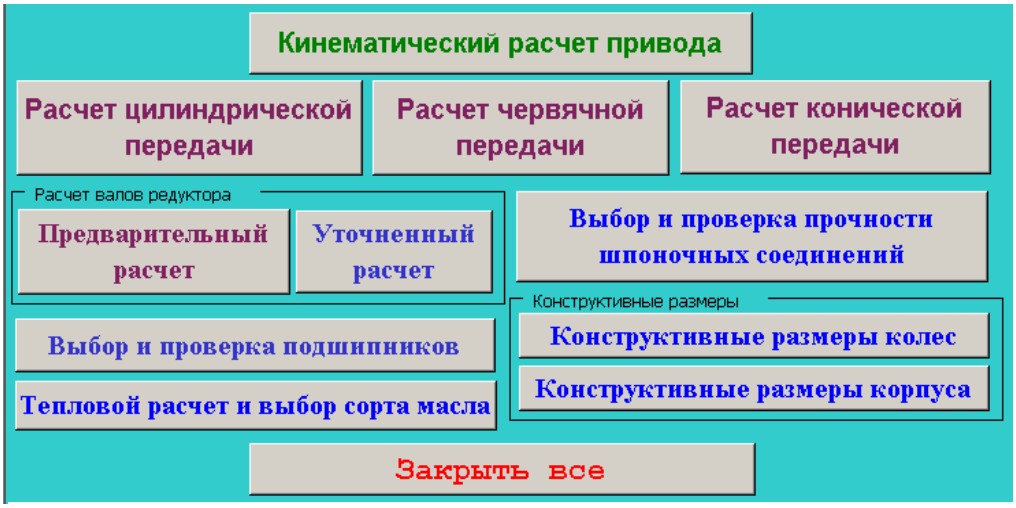


Рис. 2. Рабочий стол программы для расчета элементов привода

В данной программе используется одиннадцать основных расчетных модулей: кинематический расчет, расчет зубчатых цилиндрических колес, расчет зубчатых конических колес, расчет червячных передач, предварительный расчет валов, проверка прочности шпоночных соединений, конструктивные размеры зубчатых и червячных колес, выбор и проверка подшипников, уточненный расчет валов, конструктивные размеры корпуса, тепловой расчет и выбор сорта масла.

Каждый модуль обладает общими принципами построения и алгоритмирования. Так, в каждом модуле имеется блок исходных данных, используемых в текущем расчете и блок результатов расчета, в котором сводятся основные результаты расчета на данном этапе и далее эти результаты используются в качестве исходных данных для последующих расчетов, либо служат для выполнения чертежных работ.

Необходимая подпрограмма вызывается нажатием курсором мыши на клавишу. На мониторе компьютера появляется таблица для ввода исходных данных. Ячейки таблицы, подлежащие заполнению, выделены красным цветом. После введения исходных данных программа сама автоматически производит вычисления, результаты которых заносятся в специальную итоговую таблицу.

Расчет построен на основании ГОСТов и общепринятых норм. Каждый расчет, сохраняя общие принципы, имеет свои присущие только ему теоретические и практические решения поставленных

задач. Пояснения по конкретным расчетам, формулам приводится либо непосредственно на основном листе расчета, если они не занимают много места, либо выносятся на отдельный лист, если при этом используются таблицы ГОСТов, их графики и рисунки с подробными описаниями.

Одним из критериев использования программных ресурсов является баланс между автоматизированным выбором и принятием решений непосредственно студентами. Алгоритм предусматривает достаточно много мест соприкосновения программы расчетов и студентом. При этом студенту нет необходимости пользоваться справочной литературой для принятия решений, так как практически при всех выбираемых студентом вариантах, имеются достаточно подробные описания с таблицами, диаграммами и рисунками, которые существенно облегчают и ускоряют процесс принятия решений. Так, например, после нахождения общего передаточного числа, необходимо разбить его на частные передаточные числа двухступенчатого редуктора. Для этого достаточно перейти на лист со стандартами передаточных чисел, где можно выбрать по соответствующему ГОСТу передаточное число червячных передач, зубчатых цилиндрических или конических передач. После чего нужно вернуться на основой лист расчета. И эту операцию можно повторить неоднократно в максимально короткий промежуток времени.

Основными результатами расчетов является набор всех размеров, элементов привода, подкрепленных проверочными расчетами на прочность, необходимых для проектирования силового привода машин и построения сборочных и рабочих чертежей.

Положительный эффект от использования, рассматриваемого продукта был получен в одной группе специальности – «Гусеничные и колесные машины» Энергомашиностроительного факультета СПбГПУ в 2004 году, четырех группах Университета путей сообщения в 2005/06 годах, на протяжении шести лет с 2006 по 2012 годы на всех потоках дневной и заочной форм обучения Института сервиса автомобилей и бытовой техники СПбГУСЭ.

Использование персонального компьютера и специализированных учебных программ в полной мере отвечает требованиям образовательных стандартов, безусловно, способствуют более быстрому и качественному приобретению студентами новых знания, умений и навыков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.П. Козликин, М.М. Радкевич. Особенности подготовки бакалавров по новому федеральному государственному образовательному

стандарту. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы междунар. Науч.-практ. Конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, -С 47-50.
2. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин, Изд-во АПМ, 2005. – 472 с..
3. Шелофаст В.В, АРМ WinMachine – CAD/CAE система автоматизированного расчета и проектирования [Электронный ресурс] URL: http://www.apm.ru/rus/machinebuilding/. (дата обращения 19.03.2013)
4. Мкртычев В.М., Компьютерные технологии в преподавании ТММ – цель или средство. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы междунар. Науч.-практ. Конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. -С 96-102.
5. Ноженко И.Н., Курсовое проектирование деталей машин для студентов и преподавателей. [Электронный ресурс] URL: http://www.dm-monster.narod.ru/ (дата обращения 29.03.2013).
6. Аксенов Л.Б. Подготовка машиностроителей фундаментальность и компетентность, реальность и виртуальность. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы междунар. Науч.-практ. Конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. -С 14-16.
7. Чернавский С.А. Курсовое проектирование деталей машин, / С.А.Чернавский и др. Изд – во: Инфра – М, 2011, 439 с.
8. Гулиа, Н. В. Детали машин : учебник / Н. В. Гулиа, В. Г. Клоков, С. А. Юрков ; ред. Н. В. Гулиа. - М. : Академия, 2004. - 415,
9. Дунаев, П. Ф. Детали машин. Курсовое проектирование : учеб. пособие : допущено М-вом образования / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. - 4-е изд., испр. - М. : Машиностроение, 2003. - 536 с. : ил. - Библиогр.: с. 522-523. - Предм. указ.: с. 524-530.
10. Ерохин, М. Н. Детали машин и основы конструирования : учеб. пособие / М. Н. Ерохин [и др.] ; ред. М. Н. Ерохин. - М. : Колос С, 2004. – 463,с.
11. Анухин, В. И. Допуски и посадки : учеб. пособие : допущено М-вом образования / В. И. Анухин. - 3-е изд. - СПб. : Питер, 2004. - 207 с. : ил.
12. Шейнблит, А. Е. Курсовое проектирование деталей машин : учеб. пособие : рекомендовано М-вом образования / А. Е. Шейнблит. - 2-е изд., перераб. и доп. - Калининград : Янтарный сказ, 2004. - 454 с.

УДК 621.01

В.В.Трофимов, М.В. Основская

АВТОМАТИЗАЦИЯ «ТРУБОХОДА 300» ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ШВАХ ВНУТРИ НЕФТЕПРОВОДОВ



Валерий Васильевич Трофимов, к.ф.-м.н., с.н.с, профессор,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия, Санкт-Петербург.
Тел.: +7(921)907-1947, E-mail: vtrofimov@mail.ru



Мария Вадимовна Основская, студент,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия, Санкт-Петербург.
E-mail: osnovskayam@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы автоматизации процесса измерения напряжений в сварных швах с помощью комплекса «Трубоход 300» для автоматического измерения остаточных напряжений в сварных швах трубопроводов малого диаметра неразрушающим методом рентгеновской тензометрии. Решена проблема безударного подвода прибора (рентгеновского тензометра) в зону измерения напряжений сварного шва.

Ключевые слова: остаточные напряжения, метод рентгеновской тензометрии, автоматизация, пневматическая схема.

V.V. Trofimov, M.V. Osnovskaya

AUTOMATION OF “TRUBOHOD 300” FOR DIAGNOSTIC OF STRESSES IN FIELD WELDS INSIDE PIPE LINES

Valeriy V. Trofimov[1], e-mail: vtrofimov@mail.ru;
M. Osnovskaya[1], e-mail: osnovskayam@gmail.com.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The article deals with the automation of the process of measuring the stresses in welds by complex "Trubohod 300" for automatic measurement of residual stresses in welds of pipes of small diameter by non-destructive X-ray

strain measurement method. Fixed problem of unstressed supply of unit (X-strain gauge) in the area of stress measurement of the weld.

Key words: residual stresses, X-ray strain measurement method, automation, pneumatic circuit.

Введение

В настоящее время система магистральных нефтепроводов РФ включает 50 тыс. км трубопроводов, 400 нефтеперекачивающие станции, 900 резервуаров общей емкостью 13,5 млн м3. Значительная часть трубопроводов, эксплуатируемая в настоящее время в нашей стране, достигла амортизационного срока, а некоторые трубы находятся в эксплуатации более 50 лет. Таким образом, с каждым годом все насущнее встает вопрос о продлении срока службы нефтепроводов, отработавших свой проектный ресурс.

При проведении мониторинга технического состояния трубопроводов актуальным является исследование напряженно-деформированного состояния в поверхностных слоях неразрушающим методом рентгеноструктурного анализа (рентгеновская тензометрия). Аппарат «Трубоход 300» предназначен для измерения напряжений методом рентгеновской тензометрии внутри труб диаметром от 190 мм до 300 мм. Технические характеристики и принцип действия тензометра и трубохода представлены в работах [1,2,4,5].

Актуальность работы определяется необходимостью исследования реального напряженного состояния в трубопроводах и металлоконструкциях с целью оценки их остаточного ресурса и ремонтопригодности. Кроме того, впервые в Российской федерации с 01.09.2005 Постановлением Госстандарта России введен в действие ГОСТ Р52330-2005 «Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования». Тем самым открываются перспективы развития этих методов разработки соответствующей аппаратуры в нашей стране.

Одной из важнейших особенностей длительно эксплуатируемых нефтепроводов и газопроводов является их естественное старение - многофакторный процесс, выражающийся в том, что все материалы, из которых сделаны трубопроводы, постепенно теряют свои эксплуатационные характеристики. Это проявляется в охрупчивании, в коррозионном растрескивании под напряжением, а в ряде случаев и растрескивании металла труб и сварных соединений, эксплуатируемых, как правило, в условиях малоциклового нагружения.

При этом число аварий, вызванных разрушением труб из-за строительно-монтажных и заводских дефектов, постоянно растет. Большинство дефектов связаны с процессами сварки. Большая часть

разрывов трубопроводов приходится на сварные соединения и зону термического влияния.

Расследование аварий на магистральных нефтепроводах во многих случаях указывает на усталостный характер разрушения. Накопление повреждений металла, в основном, происходит на концентраторах напряжений, каковыми являются сварные швы, строительно-монтажные дефекты, механические повреждения. Однако в настоящее время отсутствуют объективные и физически обоснованные методы экспресс-оценки уровня накопленных в процессе циклического нагружения усталостных повреждений, что во многом затрудняет задачу корректного определения остаточного ресурса.

Кроме того, расчетным путем невозможно однозначно определить, сколько времени осталось до исчерпания ресурса, так как процесс разрушения определяется состоянием материала на микроуровне, проследить изменения которого на макроуровне удается не всегда. На примере разброса значений числа циклов до разрушения образцов, вырезанных из основного металла труб одной партии при одинаковых режимах нагружения, можно сделать вывод о том, что предсказание остаточного ресурса на основе теоретических рассуждений даже при известных механических характеристиках материала носит вероятностный характер. При этом величина ошибки расчетов может быть существенна и может отличаться от реального числа циклов до разрушения. Таким образом, вопрос об экспериментальных методах определения показателя поврежденности в настоящее время является актуальным.

В этой связи особое значение приобретают современные методики диагностирования, к которым, в частности, можно отнести метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий перейти от методов неразрушающего контроля качества сварки к элементам технической диагностики и первичным методам прогнозирования. Существующие АЭ-методики позволяют обнаруживать только активно развивающиеся на момент контроля дефекты, т. е., фактически, последнюю стадию дефектообразования. При этом не используются значительные потенциальные возможности метода эмиссии для оценки механических свойств металла конструкций. Для исследования процесса повреждаемости не обязательно применять разрушающие схемы испытаний. В настоящее время уже накоплен определенный опыт использования акустической эмиссии в качестве метода неразрушающего контроля, когда акустическое излучение вызывается путем вдавливания индентора в материал. В этом случае появление сигналов акустической эмиссии так же, как и при одноосном растяжении, связано с пластической деформацией.

Современный неразрушающий метод технической диагностики - рентгеновская тензометрия - может быть полезным при разработке методик определения остаточного ресурса металлоконструкций с учетом

истинного напряженно-деформированного состояния в любой «опасной» точке или области на поверхности в режиме реального времени.

При оценке ресурса металлоконструкций результаты исследований, полученные рентгеновским методом, могут иметь самостоятельное значение в экспертизе зон концентрации напряжений металла или дополнять данные дефектоскопии и других методов, в том числе расчетных, улучшая ресурсный прогноз оборудования.

Целью исследования является автоматизация процесса измерения напряжений в сварных швах с помощью комплекса (трубоход внутренний) для автоматического измерения остаточных напряжений в сварных швах трубопроводов малого диаметра неразрушающим методом рентгеновской тензометрии.

Автоматизация комплекса «Трубоход 300».

Примем, что трубоход уже достиг сварного шва, в котором нужно измерить остаточные напряжения, сделаны все начальные установки, была произведена центровка внутри трубы.

Для обеспечения подвода и отвода прибора в зону измерения предлагается использовать конструкцию, состав и принцип действия которой представлены в работе [3]. Эта конструкция реализуется с помощью пневматической схемы с целью обеспечения плавного и безударного подвода прибора в зону измерения. С помощью применения пневматического привода решается задача по получению точечного касания прибора с поверхностью сварного шва.

Пневматическая система реализует следующий механизм измерения остаточных напряжений в зоне сварного шва:

1. прибор подводится к поверхности трубы в место измерения;
2. конус устанавливается в соприкосновение с поверхностью;
3. включается прибор (рентгеновский излучатель);
4. время измерения от 20 до 60 секунд;
5. рентгеновский излучатель выключается;
6. прибор возвращается в исходное положение;
7. корпус с прибором поворачивается по окружности на заданный угол и устанавливается в следующее положение для измерения, и цикл повторяется снова. Всего точек измерения 5-6.

На рис. 1. представлена пневматическая схема, с помощью которой реализуется работа конструкции, на которой закреплен тензометр.

Представленная пневматическая система работает по следующему принципу: пневмодвигателем является пневматический цилиндр ПЦ. Управляющей пневматической аппаратурой являются распределители прямого действия: с механическим управлением с помощью кнопки Р1 и с управлением от роликового рычага Р8, все остальные распределители с пневматическим управлением. Рабочая жидкость подается с помощью компрессора К.

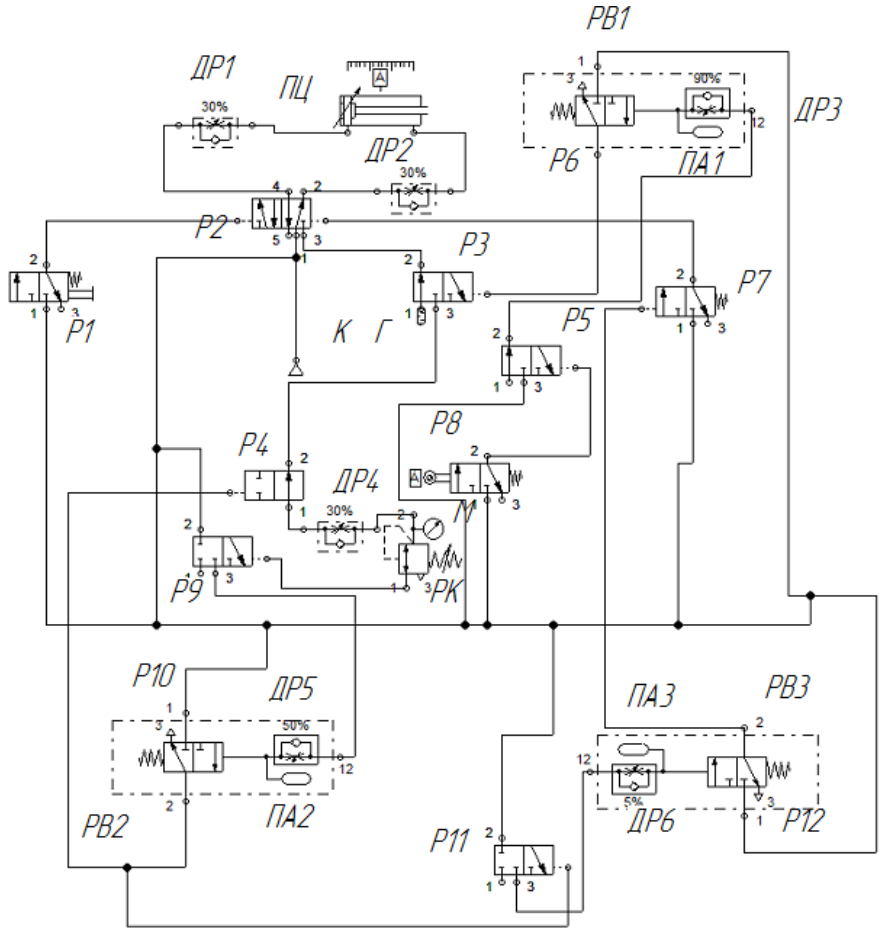


Рис. 1. Принципиальная схема работы пневматической системы. Состав пневматической системы: ПЦ – пневматический цилиндр; Р1,Р2,…,Р12 – распределители; ДР1,ДР2,…,ДР6- дроссели с обратным клапаном; К- компрессор; М - манометр; ПА1,ПА2,ПА3- пневматические аккумуляторы с Т-соединением; РК - регулируемый редукционный клапан с разгрузкой; РВ1, РВ2, РВ3 – реле времени (клапан выдержки времени); Г- глушитель шума

Рабочий цикл состоит из подъема - опускания прибора. На рис. 2 представлена циклограмма работы пневматического цилиндра.

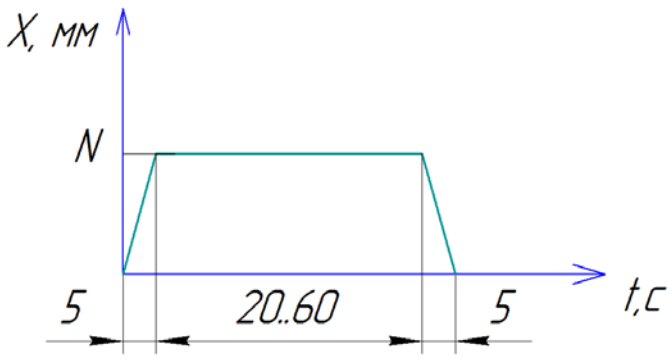


Рис. 2. Циклограмма работы пневматического цилиндра, где X- ход цилиндра, мм; t-время, с; N – рабочий ход, N=5..30 мм в зависимости от диаметра трубы

Таким образом, с помощью применения данной пневматической схемы решается задача по автоматизации процесса измерений напряжений в сварных швах с помощью комплекса «Трубоход 300» .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильясов Р.У., Трофимов В.В., Шестопалов А.А. XL неделя науки СПбГПУ. «Трубоход-мини» с рентгеновским тензометром // Материалы международной научно-практической конференции. 2011. С. 246-248.
2. Трофимов В.В., Башкарев А.Я., Краус И. Рентгеновская тензометрия – это так просто // В мире неразрушающего контроля. 2005, №1(27), С. 28-32.
3. Основская М.В., Трофимов В.В. XLI неделя науки СПбГПУ. Автоматизация трубохода для диагностики труб диаметром до 300 мм // Материалы международной научно-практической конференции. 2012 г. С.224-226.
4. В.В. Трофимов, В.В. Чижиков, Р.У. Ильясов, П.П. Панов. Применение портативного рентгеновского тензометра для контроля напряженно-деформированного состояния в бурильных трубах: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2012. С. 763 - 768.
5. И.Краус, В. В. Трофимов. Метод рентгеновской тензометрии в технической диагностике металлических изделий. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Международной практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 278 - 283.

УДК 539.261

В.В.Трофимов, В.В.Чижиков, С.С.Колесов, Р.У.Ильясов

ПРИМЕНЕНИЕ ПОРТАТИВНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ТЕНЗОМЕТРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ДЕТАЛЯХ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ УПРОЧНЕНИИ



Валерий Васильевич Трофимов, к.ф.-м.н., с.н.с, профессор, кафедра «Транспортные и технологические системы». Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург.
Тел.: +7(921)907-1947, E-mail: vtrofimov@mail.ru



Валерий Васильевич Чижиков, к.т.н., исполнительный директор отделения Weatherford International Ltd. в Санкт-Петербурге, Россия, Санкт-Петербург.
E-mail: valeriy.chizhikov@eu.weatherford.com



Сергей Сергеевич Колесов, к.т.н., руководитель лаборатории отделения Weatherford International Ltd. в Санкт-Петербурге,
Россия, Санкт-Петербург.
E-mail: skoleso1@mail.ru



Рамиль Уралович Ильясов, аспирант,
кафедра «Технология конструкционных материалов и материаловедение»,
Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург.
E-mail: ramil-4@list.ru

Аннотация

Рассмотрены результаты влияния распределения остаточных напряжений в приповерхностных слоях образцов высокопрочной стали при различных поверхностных обработках на усталостные свойства материала. Определение остаточных напряжений проводилось портативным рентгеновским тензометром ТРИМ (тензометр рентгеновский с излучателем малогабаритным). В числе опробованных и сравниваемых технологий использованы дробеструйная и ультразвуковая поверхностные обработки.

Ключевые слова: рентгеновская тензометрия, портативный прибор ТРИМ, поверхностное упрочнение, усталость.

V.V. Trofimov, V.V. Chizhikov, S.S. Kolesov, R.U. Ilyasov

APPLICATION OF THE PORTABLE X-RAY TENSOMETER SET FOR INSPECTION STRESSEDLY-DEFORMED STATE IN PARTS ON SURFACE HARDENING

Prof. Valeriy V. Trofimov[1], e-mail: vtrofimov@mail.ru;
Valeriy V. Chizhikov[2], e-mail: valeriy.chizhikov@eu.weatherford.com;
Sergey S. Kolesov[2], e-mail: skoleso1@mail.ru;
R.Ilyasov[1], e-mail: ramil-4@list.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia,
[2]Weatherford International Ltd's office in St-Petersburg, Russia

Abstract

The article is devoted to the usage of the non-destructive method – X-ray tensometry for stressedly-deformed state's analysis in high-strength steel parts on surface hardening with application of portable apparatus TRIM(X-ray tensometer with compact radiator). Technologies that have been tested and compared are shot peening and ultrasonic finishing.

Key words: – X-ray tensometry, portable apparatus TRIM, surface hardening, fatigue.

Остаточные напряжений сжатия и характер их распределения в приповерхностных слоях повышает усталостную прочность изделий в несколько раз. Применение известных методов поверхностного упрочнения, включая дробеструйную обработку, безабразивную ультразвуковую финишную обработку (БУФО) и т.д. повышает надежность и долговечность конструкций. Актуальными являются экспериментальные исследования напряженного-деформированного состояния в приповерхностных слоях образцов с применением портативного рентгеновского тензометра ТРИМ [1].

Цель работы - измерение остаточных напряжений портативным рентгеновским тензометром ТРИМ после различных поверхностных обработок и изучение их влияния на усталостные характеристики материала. Исследования выполнены на образцах из нержавеющей стали состава: 0,02%C; 11,0%Ni; 12%Cr; 1,5%Ti и 1,0%Mo. Усталостные испытания выполняли при комнатной температуре по схеме изгиб с вращением при нагрузке 980МПа до разрушения (при базе 10^7 циклов). Замеры остаточных напряжений выполнены прибором ТРИМ на двух типах образцов:

1. усталостные образцы (рис.1);
2. цилиндрические образцы (∅18мм).

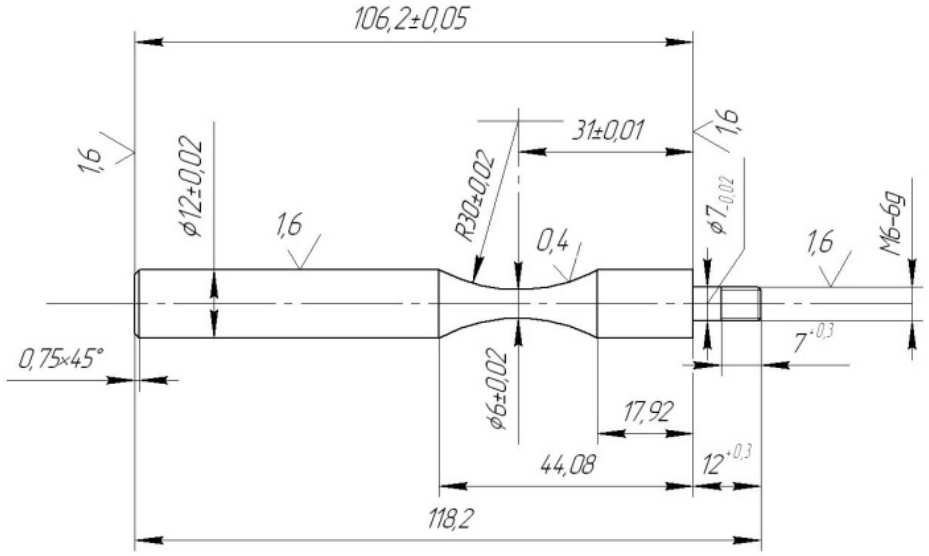


Рис.1. Опытный образец диаметром 12 мм

Усталостные свойства материала и остаточные напряжения замерялись до и после различных поверхностных обработок (дробеструйной обработки, БУФО).

Результаты испытаний на усталость после дробеструйной обработки:

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость

Напряжения, МПа	Количество циклов до разрушения при 20ºС
980	190880;156000

Таблица 2. Шероховатость поверхности в зависимости от вида обработки.

Вид обработки	Шероховатость поверхности (Ra), мкм
дробеструйная обработка	0,75
БУФО	0,61

Таблица 3.Остаточные напряжения до и после дробеструйной обработки

Остаточные напряжения до дробеструйной обработки, МПа	Количество циклов до разрушения на воздухе и при 20ºС	Остаточные напряжения до дробеструйной обработки, МПа	Количество циклов до разрушения после дробеструйной обработки
+160	190800; 156000	-409 -501	523000 492900

Исследования на усталость (рис. 2.)проводили при комнатной температуре на воздухе (частота вращения - 400 об/мин , напряжения - 60 % от предела текучести).

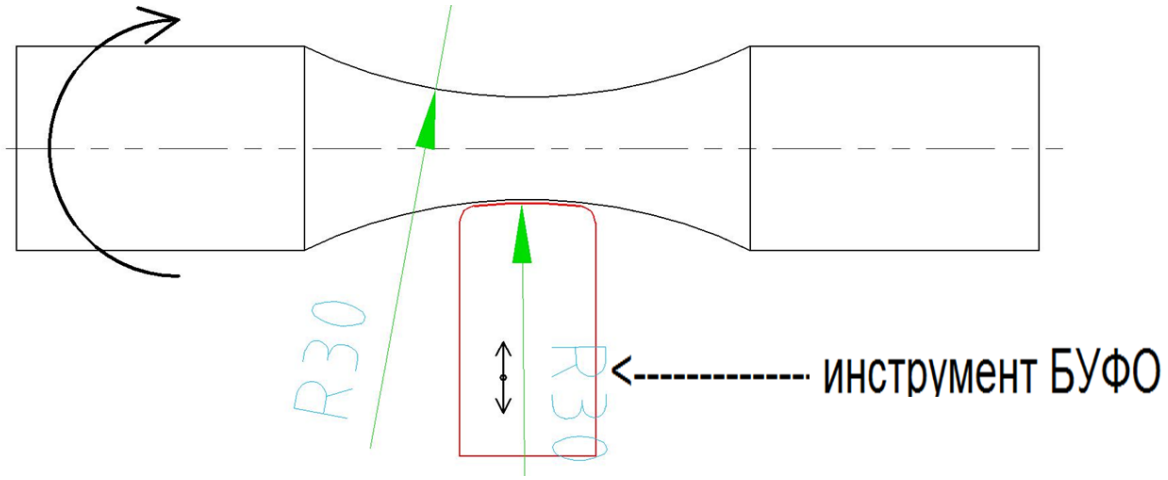


Рис. 2. Схема безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО) опытного образца.

Табл.4 Остаточные напряжения и количество циклов до разрушения в образцах до и после БУФО.

Остаточные напряжения до БУФО, МПа	Остаточные напряжения после БУФО, МПа	Количество циклов до разрушения на воздухе при 20ºС	Количество циклов до разрушения после БУФО
+170	-415	190800 156000	1300000 780300

Замеры осевых остаточных напряжений проводили на цилиндрических образцах при послойном стравливании от поверхности для оценки характера распределения остаточных напряжений после различных поверхностных обработок.

Проведенные исследования показали, что безабразивная ультразвуковая финишная обработка приводит к образованию остаточных напряжений сжатия вблизи поверхности до максимальной величины. Установлено, что БУФО для высокопрочных стальных деталей является эффективным методом поверхностного упрочнения: увеличивает до 6 раз ресурс деталей при цикловом нагружении, а также увеличивает сопротивление коррозии под напряжением.

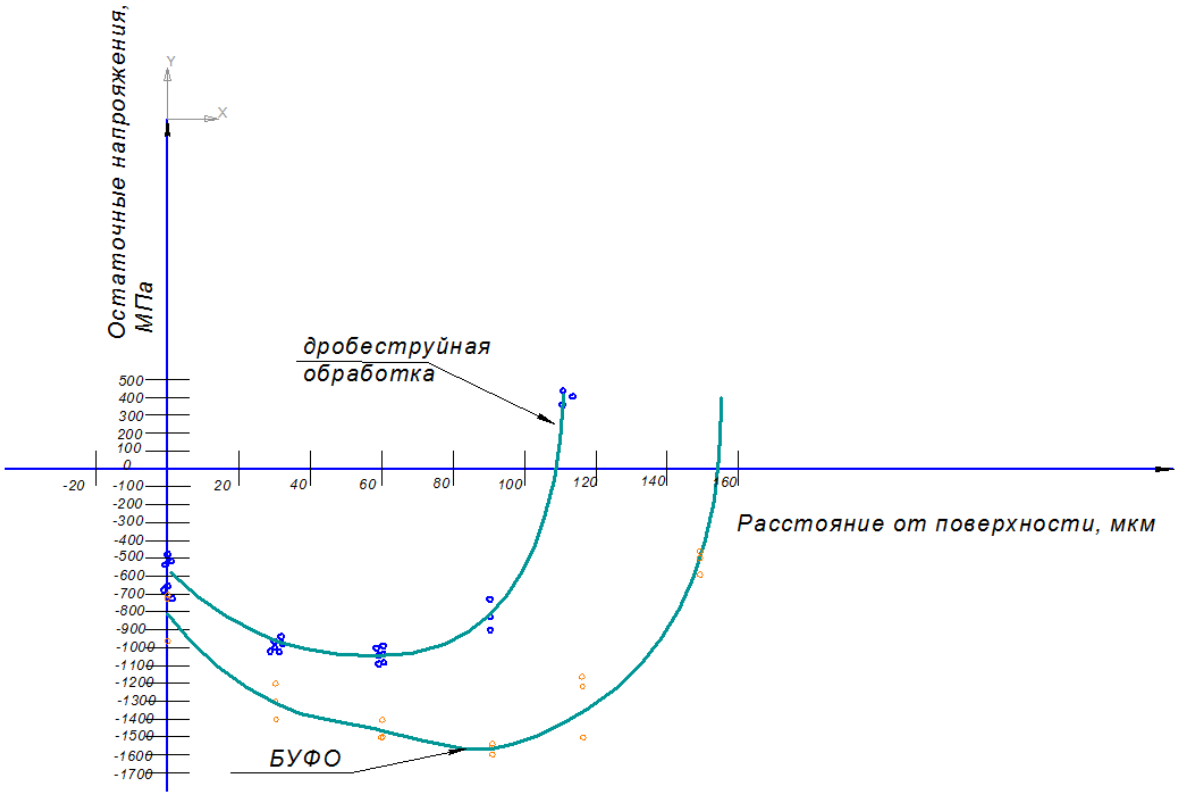


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в приповерхностных слоях

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Трофимов, В.В. Чижиков, Р.У. Ильясов, П.П. Панов. Применение портативного рентгеновского тензометра для контроля напряженно-деформированного состояния в бурильных трубах // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.2012. С. 763 - 768.

УДК 621.22:621.892.21

Е.Е. Харламова, А.С. Гуреева

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ



Евгения Евгеньевна Харламова, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-77-34, E-mail: vektraz@mail.ru



Александра Сергеевна Гуреева, студент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911) 001-97-03, E-mail: alexgureeva@mail.ru

Аннотация

Объект исследования – показатели качества гидравлических масел, представленные в отечественных, зарубежных и международных стандартах, степень чистоты гидравлического масла.

Целями настоящего проекта стали обзор и анализ систем показателей качества гидравлических масел, представленных в отечественных, зарубежных и международных стандартах, анализ показателя «степень чистоты» гидравлического масла, разработка на основе данной информации проекта стандарта о гидравлических маслах, экспериментальные исследования степени чистоты гидравлических масел.

Ключевые слова: гидравлические масла, система показателей качества, степень чистоты.

E.E. Kharlamova, A.S.Gureeva

RESULTS OF RESEARCH OF HYDRAULIC OIL QUALITY RATING SYSTEM

Evgeniya E. Kharlamova[1], e-mail: vektraz@mail.ru;
Alexandra S. Gureeva[1], e-mail: alexgureeva@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

Object of research - quality characteristics of hydraulic oils, presented in national, foreign and international standards, characteristic "cleanliness" of hy-

draulic oils.

The objectives of this project were review and analysis of quality rating system of hydraulic oils, presented in domestic, foreign and international standards, the analysis of the characteristic "cleanliness" of hydraulic oil, development of the draft of new standard for hydraulic oils, experimental test of cleanliness of hydraulic oils.

Key words: hydraulic oils, quality rating system, cleanliness.

Безотказность и долговечность работы современных точных гидравлических механизмов напрямую зависят от состояния используемых гидравлических масел. Согласно данным фирм, специализирующихся на изготовлении гидравлического оборудования, таких как Vickers, Parker, Bosch Rexroth, Hydac, около 80% неисправностей в гидравлических системах являются следствием загрязненности рабочей жидкости [8, 9]. Современное гидравлическое оборудование изготовлено таким образом, что зазоры между его движущимися частями чрезвычайно малы и попадание загрязнений, соразмерных этими зазорами, может привести к выходу из строя оборудования. Например, в поршневых насосах частицы загрязнений интенсивно изнашивают рабочие поверхности (рис. 1), тем самым увеличиваются объемные потери и происходит снижение производительности насосов. Аксиально-поршненвые насосы с наклонной шайбой при работе с загрязненной рабочей жидкостью перестают держать рабочие давления уже через 8 минут.

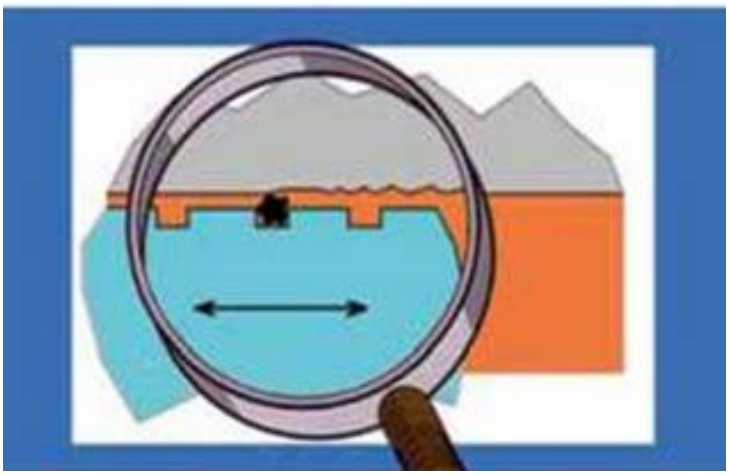


Рис. 1. Схема износа рабочих поверхностей поршневого насоса загрязняющими частицами [8]

На рис. 2 представлено соотношение между отдельными загрязняющими частицами и зазорами в компонентах гидропривода.

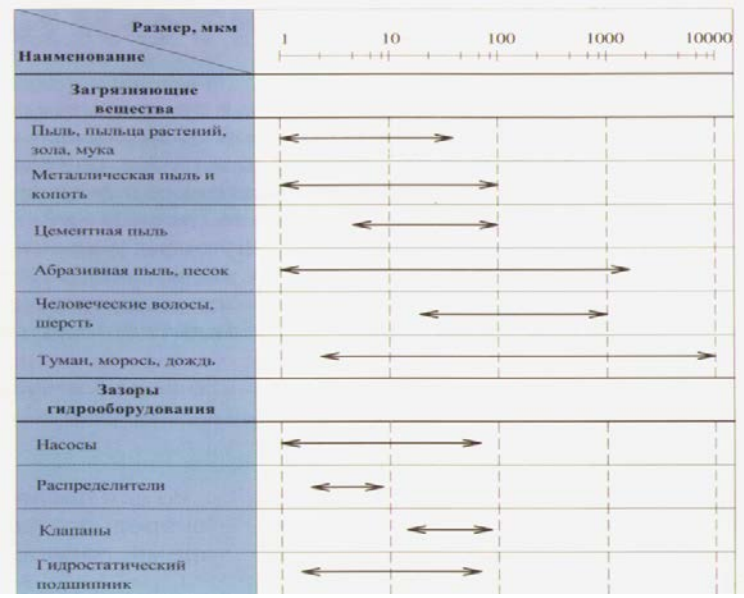


Рис. 2. Соотношение между величиной зазоров гидрооборудования и размерами загрязняющих частиц [7]

По европейским стандартам загрязненность масла нормируется показателем качества «степень чистоты», которая определяется, как последовательность трех классов, соответствующих количеству загрязняющих частиц, подсчитанных в пределах трех групп размеров (≥ 4 мм, ≥ 6 мм, ≥ 14 мм), например, 21/19/17 [5]. В отечественных стандартах же нет такого показателя (присутствует только показатель «класс чистоты», который определяет загрязненность в зависимости от массы загрязняющих частиц, но не учитывает их размеров). В связи с чем, возникает трудность определения и сравнения данных европейских и отечественных стандартов. Стандарты, представляющие отечественную систему показателей качества, давно не пересматривались (ГОСТ 4.24-84 – последняя редакция 1984 год). Также в российских стандартах нет единой четкой системы классификации гидравлических масел. В настоящее время, с развитием рыночных отношений российский потребитель все чаще использует иностранные гидравлические масла. Анализ зарубежной системы показателей качества гидравлических масел показал, что она предлагает большое количество различных сложных физических и химических показателей качества. Это запутывает потребителя.

В таблице 1 приведены показатели качества в соответствии с различными стандартами. Как видно из таблицы, в отечественном стандарте отсутствуют многие показатели по сравнению с зарубежными стандартами.

Различные отечественные стандарты по разному классифицируют гидравлические масла, относя их то к классу индустриальных, то гидравлических, а то и вовсе – трансмиссионных.

Таблица 1. Показатели качества гидравлических масел [1, 4, 6]

ГОСТ 4.24-84	**ISO 11158:2009**	**DIN 51524-3-2006**
Кинематическая вязкость	Кинематическая вязкость при -20°С, 0°С, 40°С, 100°С;	Кинематическая вязкость при -20°С, 0°С, 40°С, 100°С
Индекс вязкости	Индекс вязкости	Индекс вязкости
Температуры вспышки	Температура вспышки	Температура вспышки
Температура застывания	Температура застывания	Температура застывания
-	Степень чистоты по ISO 4406:1999	Степень чистоты по ISO 4406:1999
Массовая доля механических примесей	-	Содержание твердых примесей, макс.
-	Фильтруемость без воды, с водой	Фильтруемость без воды, с водой
-	Деэмульгирование при 54°С, при 82°С	Деэмульгирование при 54°С, при 82°С
Массовая доля воды	Содержание воды, %	Содержание воды, %
Коррозионные потери металлов	Антикоррозионные свойства стали, 24ч	Антикоррозионные свойства стали, 24 ч
	Коррозионное воздействие на медь 3ч при 100°С, степень коррозии	Коррозионное воздействие на медь 3ч при 100°С, степень коррозии
Стабильность состава Термоокислительная стабильность	Увеличение кислотного числа после 1000ч	Увеличение кислотного числа после 1000ч
-	Реакция на уплотнительный материал NBR 1, 100°С, 168 ч	Реакция на уплотнительный материал NBR 1, 100°С, 168 ч
-	Воздухоотделение, при 50°С, при 75°С	Воздухоотделение при 50°С
Вспениваемость	Пенообразование, мл, при 24°С, при 93,5°С, свыше 95°С	Пенообразование, мл, при 24°С, при 93,5°С, свыше 95°С
Критическая нагрузка заедания	Механическое испытание машине с зубчатым колесом (FZG)	Механическое испытание машине с зубчатым колесом (FZG)
-	Механическое испытание в шиберном насосе, весовая потеря кольца,шибера, мг	Механическое испытание в шиберном насосе, весовая потеря кольца,шибера, мг
Плотность	Плотность при 15°С	Плотность при 15°С
Кислотное число	Кислотное число, мг КОН на 1 г	Кислотное число, мг КОН на 1 г
Зольность	Зольность, в %	Зольность, в %
Цвет	Цвет	-
Стабильность вязкости	Относительное снижение вязкости при 40°С	Относительное снижение вязкости при 40°С

На основе вышеизложенного можно сформулировать три проблемы:

- отечественные стандарты не актуальны;
- отсутствие единой четкой системы классификации, обозначения и системы показателей качества гидравлических масел;
- такой важнейший показатель, как «степень чистоты» не учитывается отечественными стандартами и не является обязательным к определению.

В связи с чем, задачами проекта были обзор и анализ нормативной документации, а также проведение экспериментальных исследований степени чистоты современных масел в состоянии поставки, а также разработка

проекта единого стандарта, который включал бы в себя нормативную информацию о гидравлических маслах и устанавливал систему показателей качества гидравлических масел.

В качестве методики проведения эксперимента по определению степени чистоты гидравлических масел различных марок была разработана методика в соответствии с ISO 11500:2008 «Приводы гидравлические. Определение загрязнения рабочей жидкости для гидравлических систем твердыми частицами методом автоматического подсчета, используя принцип затухания света». Основные положения данной методики используются в экспериментальном исследовании с небольшими дополнениями (с учетом специфичности автоматического счетчика частиц, устройства подачи масла, в качестве которого использовались медицинские одноразовые шприцы).

В испытаниях использовался автоматический счетчик частиц HYDAC CS 1000 Series Contamination Sensor (рис. 3). Данный прибор предназначен для измерения фотоэлементом количества загрязняющих частиц при подключении его в гидравлическую систему и обеспечении расхода жидкости (вязкостью не большей 1000 мм^2/с) в пределах 30-300 мл/мин [10].

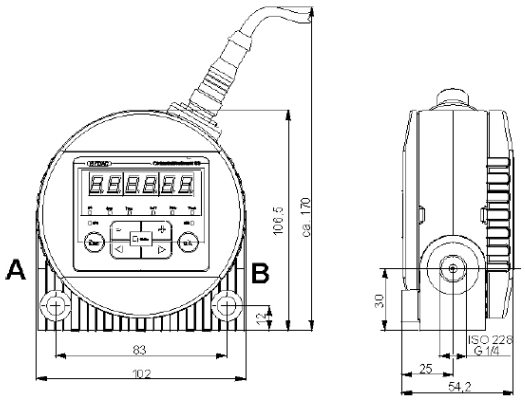


Рис. 3. Прибор HYDAC CS 1000 Series Contamination Sensor

Суть методики состоит в пропускании пробы гидравлических масел через данный прибор, который показывает степень чистоты в соответствии с двумя стандартами (ISO 4406:1999, SAE AS 4059-2001). Шприц с пробой масла (2 на рисунке 4) устанавливается вертикально в специальный переходник (3 на рисунке 4) и с помощью груза массой 5,7 кг (1 на рисунке 4) обеспечивается пропускание масла через прибор.

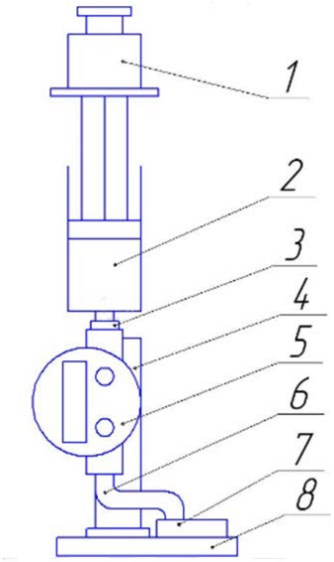
Масса груза рассчитывается из условия обеспечения оптимального расхода жидкости, который указан в паспорте прибора (Q=30-300 мл/мин).

Между измерениями внутренние поверхности прибора очищаются пропусканием через него очищающей жидкости, в качестве которой использован уайт-спирит, и продуваются воздухом с помощью неиспользованного шприца.

Пробы берутся с помощью медицинских одноразовых шприцов объе-

ма 150 мл из бочек с маслом. Шприц стерилен и находится в стерильной упаковке, что исключает возможность попадания в него механических включений.

Испытательный стенд состоит из прибора, измеряющего степень чистоты рабочей жидкости, устройства для подачи рабочей жидкости, несущей рамы и емкости для слива рабочей жидкости (рисунок 4). Подача масла в прибор осуществляется с помощью шприца и специальной насадки (3 на рис. 4) с расходом в пределах 30-300 мл/мин.



(1 – груз; 2 – шприц; 3 – переходник; 4 – стойка; 5 – прибор; 6 – шланг сливной; 7 – емкость для слива; 8 – основание)

Рис. 4. Схема испытательного стенда

В таблице 2 представлены результаты эксперимента.

Таблица 2. Результаты проекта

Марка масла	**Производитель**	**Степень чистоты, измеренная автоматическим счетчиком частиц** HYDAC CS*	**Степень чистоты, полученная в независимой испытательной лаборатории ООО «Мортестсервис»****	**Заявленная производителем степень чистоты**
Equivis ZS 32	Total	21/19/16	-/16/13	-
Equivis ZS 46	Total	20/18/16	-/11/9	-
HLP 46	Addinol	21/19/17	-/16/13	21/19/16
Hydraulic HLP 32	Gazpromneft	21/19/17	-	-
Гидравлик HLP 46	ТНК	22/20/18	-	-/14/12

«*» - степень чистоты по ISO 4406:1999.
«**» - пересчитанная на ISO 4406:1999 в соответствии с таблицей 2.21 степень чистоты:
«-»- означает, что данный размер частиц не нормировался в связи с тем, что измерение было проведено в соответствии с ГОСТ 17216-2001 [2].

Параллельно с экспериментом такие же порции масла исследовались в специальной независимой лаборатории ООО «Мортестсервис». Результа-

ты этих исследований, а также данные с этикеток тары производителей масел представлены в таблице 2.

Расхождения в данных таблицы 2 можно объяснить следующим. ГОСТ 17216-2001 позволяет по переводным таблицам оценивать результат степени чистоты согласно ИСО 4406:1990, но приблизительно. ГОСТом не определяются частицы с размерами 4-6 мкм (первое значение цифр), а вместо частиц размером 6-14 мкм (второе значение цифр), оцениваются частицы размером 5-15 мкм, вместо частиц размером ≥ 14 мкм (третье значение цифр) оцениваются частицы размером ≥ 15 мкм. Поэтому к данным ООО «Мортестсервис» следует относиться справочно. Следует также отметить, что совсем мало производителей масел, кто указывает в своих документах степень чистоты масел.

Предлагаемый проект нового стандарта объединяет в себе актуальные требования к гидравлическим маслам, такие, как уточненная классификация, единое обозначение, система показателей качества со ссылками на стандарты, содержащие описание методов определения данных показателей качества, требования к степени чистоты масла, упаковке, транспортировке и хранению и требования к безопасности, а в приложениях указаны соответствия обозначения масел по различным стандартам.

Классификация гидравлических масел следующая:

Класс – Смазочные материалы, индустриальные масла и родственные продукты.

Семейство – Гидравлические масла

Вид – Гидростатические системы

Группа – HH, HL, HM, HV (HH – гидравлическое масло без присадок, HL – гидравлическое масло с антиокислительными и антикоррозионными присадками, HM – гидравлическое масло с антиокислительными, антикоррозионными и противоизносными присадками, HV – гидравлическое масло с антиокислительными, антикоррозионными и противоизносными присадками с улучшенными вязкостно-температурными характеристиками) [3].

Обозначение, в соответствии с данной классификацией и с ISO 6743-4:1999 «Материалы смазочные, индустриальные масла и родственные продукты (класс L). Классификация. Часть 4. Семейство H (гидравлические системы)» включает в себя обозначение класса (смазочные материалы, индустриальные масла и родственные продукты – «L»), обозначение группы масла («HH», «HL», «HM», «HV») и обозначение класса вязкости в соответствии с ISO 3448 «Индустриальные смазочные материалы. Классификация вязкости по ISO». Допускается краткая запись – обозначение группы и обозначение класса вязкости.

На рис. 5 представлена уточненная система показателей качества гидравлических масел.

Показатели		Рекомендуемый метод определения	Группа гидравлических масел							
			HH	HL		HM		HV		
1		3	4	5		6		7		
Кинематическая вязкость	-20°C	ГОСТ 33-2000	▼	▼	◙	▼	◙	▼	◙
	0°C			▼	◙	▼	◙	▼	◙
	40°C			▼	◙	▼	◙	▼	◙
	100°C			▼	◙	▼	◙	▼	◙
Индекс вязкости		ИСО 2909:2002	▼	▼		▼	◙	▼	◙
Плотность		ДИН 51757-2011 ИСО 3675:1998	▼	▼	◙	▼	◙	▼	◙
Температура потери текучести		ИСО 3016:1994 ГОСТ 20287-91	▼	▼	◙	▼	◙	▼	◙
Температура вспышки		ИСО 2592:2000	▼	▼	◙	▼	◙	▼	◙
Степень чистоты		по п.7 настоящего стандарта	▼	▼	◙	▼	◙	▼	◙
Содержание воды		ИСО 12973:2000	▼	▼	◙	▼	◙	▼	◙
Кислотное число		ИСО 6618:1997	▼	▼		▼	◙	▼	◙
Деэмульгирование, время	54°C	ИСО 6614:1994	▼	▼	◙	▼	◙	▼	◙
	82°C		▼	▼	◙	▼	◙	▼	◙
Реакция на уплотнительный материал NBR, 100°C, 168 ч		ИСО 1817:2011	▼	▼	◙	▼	◙	▼	◙
Коррозионное воздействие на медь, 3ч, при 100°C		ИСО 2160:1998		▼	◙	▼	◙	▼	◙
Антикоррозионные свойства стали		ДИН ИСО 7120-2000			◙		◙		◙
Пенообразование	24°C	ИСО 6247:1998		▼	◙	▼	◙	▼	◙
	93,5°C			▼	◙	▼	◙	▼	◙
	свыше 95°C			▼	◙	▼	◙	▼	◙
Воздухоотделение	50°C	ИСО 9120:1997		▼	◙	▼	◙	▼	◙
	75°C			▼		▼		▼	
Поведение при старении Увеличение кислотного числа после 1000ч		ИСО 4263-1:2003		▼	◙	▼	◙	▼	◙
Механическое испытание в FZG испытательной машине с зубчатым колесом, дефект ступени каскада		ИСО 14635-1:2000				▼	◙	▼	◙
Механическое испытание в шиберном насосе (мг износ)	кольцо	ИСО 20763:2004				▼	◙	▼	◙
	шибер					▼	◙	▼	◙
Фильтруемость с водой	Степень 1	ИСО 13357-1:2002			◙	▼	◙	▼	◙
	Степень 2				◙	▼	◙	▼	◙
Фильтруемость без воды	Степень 1	ИСО 13357-2:2005			◙	▼	◙	▼	◙
	Степень 2				◙	▼	◙	▼	◙
Примечания:									
▼	- означает, что значение данного показателя определяет ИСО 11158:2009.								
◙	- означает, что значение данного показателя определяет ДИН 51524-2006 (часть 1,2,3).								

Рис. 5. Система показателей качества гидравлических масел

Для упрощения выбора потребителем определенной марки гидравлического масла была разработана автоматизированная система, которая представляет собой базу данных, в которой содержатся данные о марках масел (показатели качества, такие как вязкость, степень чистоты, температура вспышки, температура застывания, кислотное число и т.д.), данные о поставщиках масел на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Выбор марки масла осуществляется по определенным характеристикам. Потребитель может выбрать марку масла, ориентируясь, прежде всего на вязкостно-температурную характеристику, так как это главный критерий выбора масла для определенного гидрооборудования. Также он может

получить всю информацию о соответствии масла тому или иному стандарту, информацию о степени чистоты, температурах застывания и вспышки и т.д. База данных позволяет не только узнать номер стандарта, но и вывести текст стандарта или распечатать сертификат соответствия на данное масло.

Структура базы данных представлена на рисунке 6. Пример поиска гидравлического масла по вязкости представлен на рисунке 7.

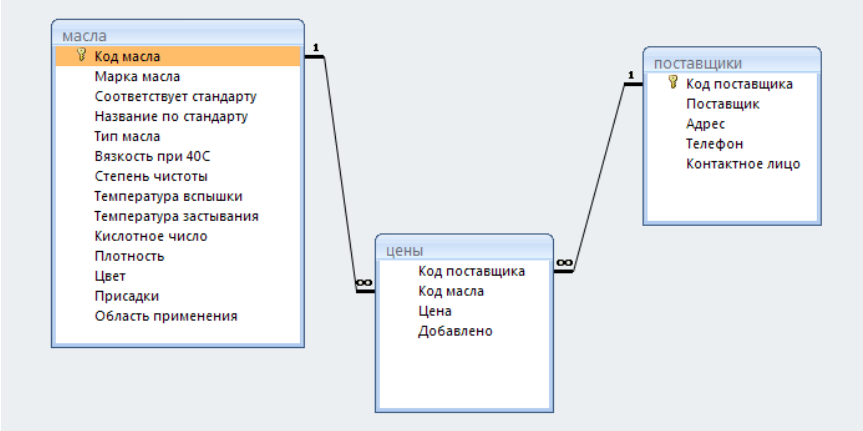


Рис. 6. Структура базы данных

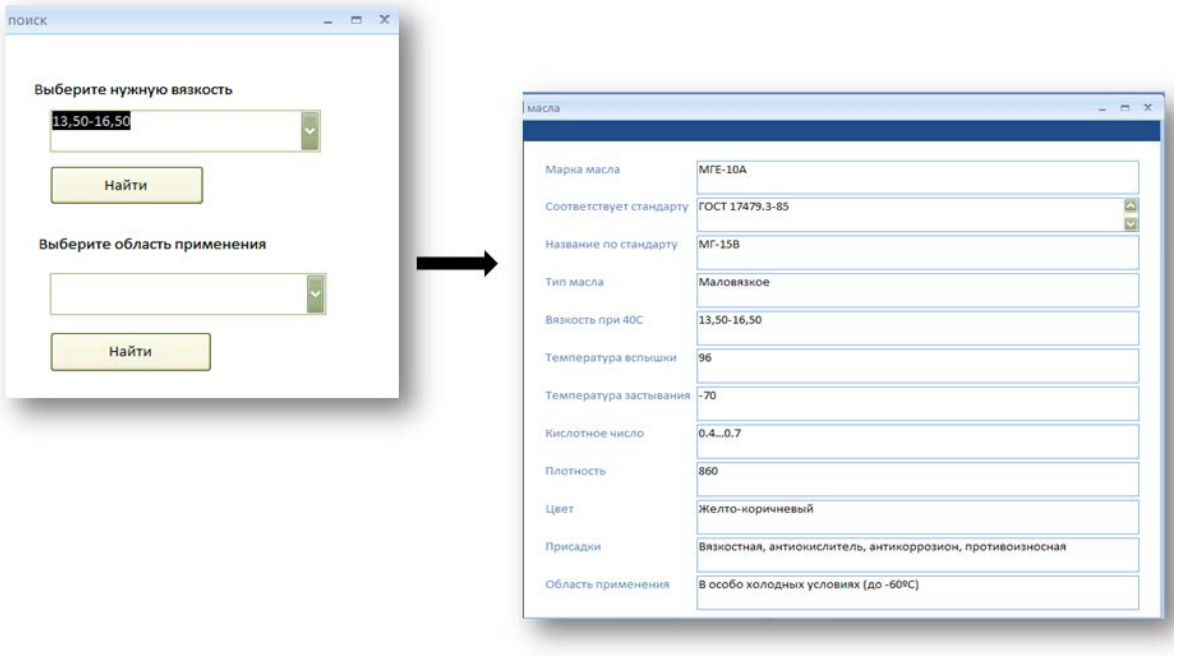


Рис. 7. Пример поиска гидравлического масла

Таким образом, проведенные исследования в области стандартизации и системы качества гидравлических масел должны упростить выбор масел и исключить ошибки на стадии проектирования гидрофицированных машин, продвинуть на рынке лучшие отечественные масла, обеспечить безошибочный подбор аналогов масел в период смены масел при эксплуа-

тации машин, что в целом, безусловно, обеспечит безотказную работу машин и механизмов с гидроприводом и увеличит их срок службы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 4.24-84 «Система показателей качества продукции. Масла смазочные. Номенклатура показателей», 1985, Министерство химической и нефтеперерабатывающей промышленности СССР, 16 с.
2. ГОСТ 17216-2001 «Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей», 2003, ГОССТАНДАРТ России, 11 с.
3. ISO 6743-4:1999 «Материалы смазочные, индустриальные масла и родственные продукты (класс L). Классификация. Часть 4. Семейство H (гидравлические системы)», 1999, TC 28/SC 4, 6 с.
4. ISO 11158:2009 «Смазки, промышленные масла и соответствующие продукты (класс L). Группа H (гидравлические системы). Технические условия на категории HH, HL, HM, HR, HV и HG», 2009, TC 28/SC 4, 20 с.
5. ISO 4406:1999 «Приводы гидравлические. Жидкости. Метод кодирования степени загрязнения твердыми частицами», 1999, TC 131/SC 6, 12 с.
6. DIN 51524-3-2006 «Масла гидравлические. Часть 3. Гидравлические масла типа HVLP. Минимальные требования», 2006, 8 с.
7. Ащеулов А.В., Шеншов В.С. Производство надежных гидрофицированных машин//Современное машиностроение, №1(3), 2006. С.16-19.
8. Корнюшенко С.И. «Устройство гидроприводов мобильных машин. Часть 1». Москва, 2011.-112 с.
9. HYDAC International статья «Загрязнения в рабочей жидкости и их влияние износ оборудования», 2001, технический директор представительства HYDAC в Украине А. Кочберски и главный специалист по ИТ Полохов С.В., 3 с.
10. Руководство по эксплуатации прибора HYDAC Contamination Sensor, 2006, 98 с.

УДК 004.021

В.А. Чеканин, А.В. Чеканин

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СВОБОДНЫМИ ПРОСТРАНСТВАМИ КОНТЕЙНЕРОВ В ЗАДАЧЕ ОРТОГОНАЛЬНОЙ УПАКОВКИ ОБЪЕКТОВ



Владислав Александрович Чеканин, к.т.н., доцент ФГБОУ ВПО МГТУ «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (916)881-1759, E-mail: vladchekanin@rambler.ru



Александр Васильевич Чеканин, д.т.н., профессор,
ФГБОУ ВПО МГТУ «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (916)308-4898, E-mail: avchekanin@rambler.ru

Аннотация

Рассматривается задача ортогональной упаковки объектов в контейнерах произвольной размерности. Предлагается новая модель управления свободными пространствами контейнеров. Показана эффективность разработанной модели потенциальных контейнеров на примере задачи трехмерной ортогональной упаковки объектов.

Ключевые слова: задача ортогональной упаковки, задача контейнерной упаковки, распределение ресурсов, оптимизация

V.A.Chekanin, A.V.Chekanin

A MODEL OF MANAGING FREE SPACES OF CONTAINERS FOR THE ORTHOGONAL PACKING PROBLEM

Vladislav A. Chekanin[1], e-mail: vladchekanin@rambler.ru
Alexander V. Chekanin[1], e-mail: avchekanin@rambler.ru
[1]Moscow State University of Technology «STANKIN», Russia

Abstract

The orthogonal packing problem is considered. A new model of managing free spaces of containers is presented. The efficiency of the designed model of potential containers is shown on a three-dimensional orthogonal bin packing problem.

Key words: orthogonal packing problem, bin packing problem, packing, recourse allocation, optimization

Введение

Задача ортогональной упаковки объектов представляет собой задачу оптимального размещения заданного набора ортогональных объектов в ортогональных контейнерах при выполнении следующих условий [11-12]:

1) ребра размещенных в контейнере ортогональных объектов параллельны ребрам этого контейнера;
2) упакованные объекты не перекрывают друг друга;
3) упакованные объекты не выходят за границы контейнеров.

К решению этой задачи сводится множество практических задач распределения ресурсов [1, 5-8], в частности, задач календарного планирования, контейнерной перевозки грузов [2, 9] и др.

Для управления свободными пространствами контейнеров в задаче ортогональной упаковки могут быть использованы следующие модели представления объектов в контейнерах: блочная [3], узловая и модель «виртуальные объекты» [4, 10], обеспечивающая наиболее быстрое среди прочих моделей размещение объектов. Основной недостаток модели «виртуальные объекты» – существование вероятности образования при решении задач упаковки размерности выше двух локальных пустот в контейнерах, снижающих плотность размещения объектов в контейнерах [10].

Модель потенциальных контейнеров

Разработанная модель потенциальных контейнеров является развитием модели «виртуальные объекты». В основе этой модели лежит модель управления свободными пространствами контейнера (так называемыми потенциальными контейнерами), которая включает алгоритм образования потенциальных контейнеров и алгоритм поиска и удаления вложенных потенциальных контейнеров. Модель потенциальных контейнеров в отличие от модели «виртуальные объекты» описывает все существующие свободные пространства размещаемого контейнера, что исключает вероятность образования неконтролируемых локальных пустот контейнера. На рис. 1 приведены возникающие при размещении трехмерного объекта потенциальные контейнеры, описывающие все существующие свободные для размещения пространства контейнера.

Блок-схема алгоритма размещения заданной последовательности объектов в контейнерах при использовании модели потенциальных контейнеров приведена на рис. 2.

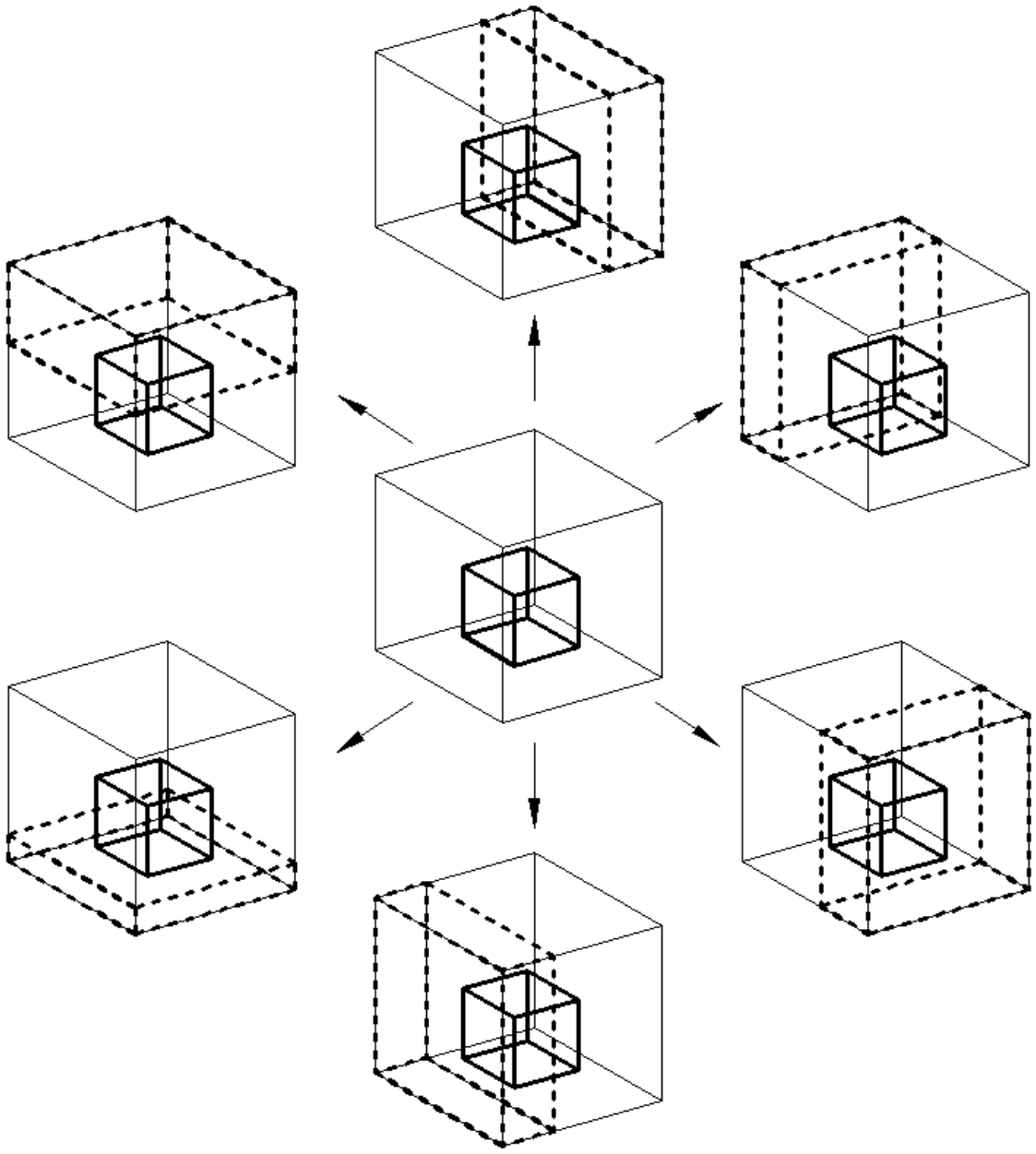


Рис. 1. Потенциальные контейнеры в задаче трехмерной упаковки

Вычислительный эксперимент

Исследование эффективности модели потенциальных контейнеров проводилось при решении задачи упаковки 500 трехмерных объектов шести различных типов в ортогональный контейнер с габаритными размерами 300×100×100. Параметры решаемой задачи приведены в таблице 1.

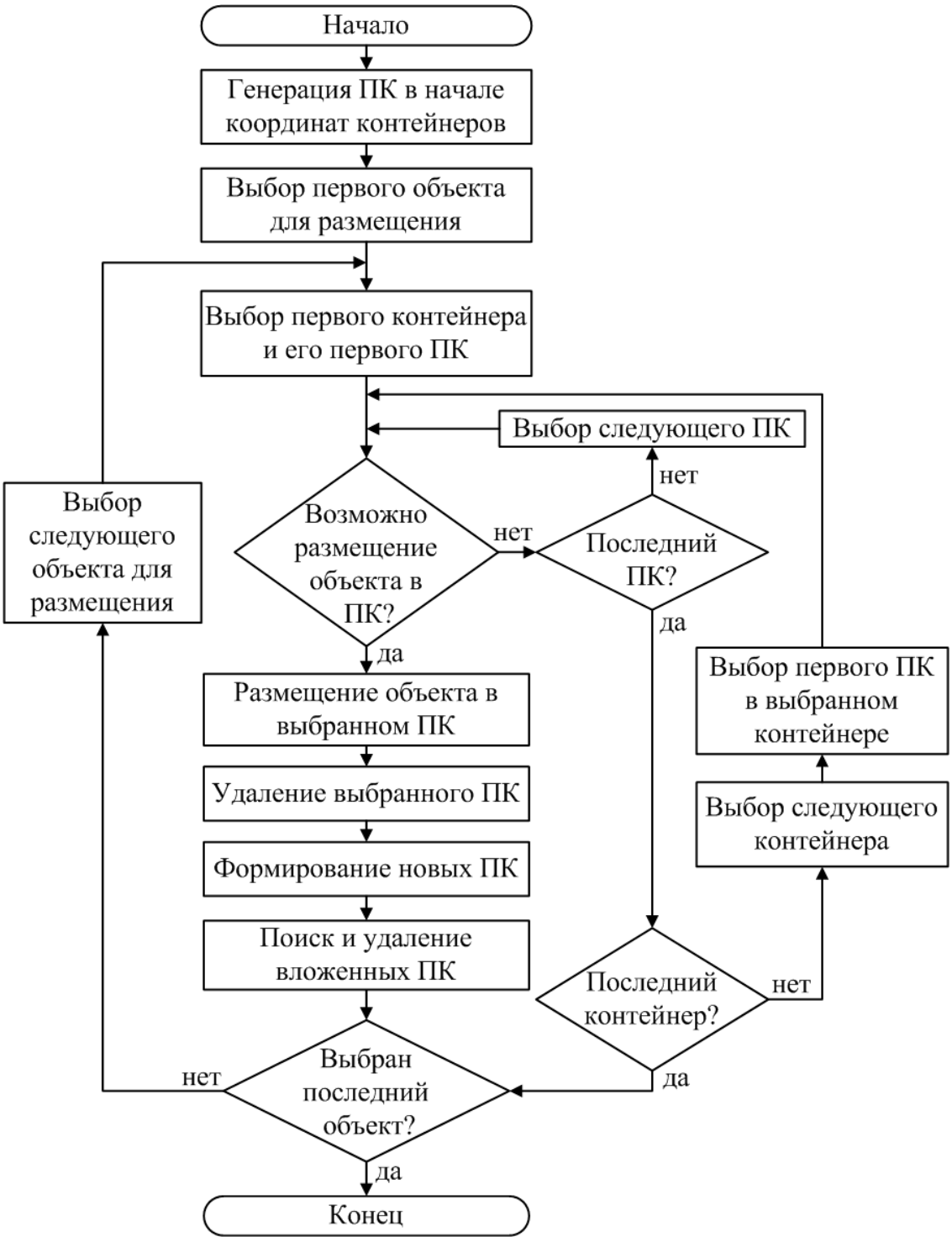


Рис. 2. Блок-схема алгоритма размещения объектов в модели потенциальных контейнеров (ПК)

В качестве показателя размещения объектов в одном контейнере выбрана относительная плотность размещения объектов S, которая рассчитывается в виде отношения объема размещенных в контейнере объектов к объему V^* описанного вокруг полученной D-мерной упаковки D-мерного параллелепипеда:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n^*} \prod_{d=1}^{D} w_i^d}{V^*},$$

где n^* – число размещенных в контейнере объектов; w_i^d – габаритный размер объекта i, измеренный в направлении оси d контейнера; D – размерность решаемой задачи упаковки. Значение относительной плотности размещения $S = 1$ соответствует наиболее плотному размещению объектов.

Таблица 1. Параметры тестовой задачи трехмерной упаковки

№	Габаритные размеры размещаемых объектов	Количество
1	50×30×10	20
2	10×30×60	20
3	25×30×25	20
4	25×25×25	20
5	10×10×10	20
6	5×5×5	400

Проведенный вычислительный эксперимент (таблица 2) показал, что разработанная модель потенциальных контейнеров обеспечивает более плотное размещение объектов по сравнению с моделью «виртуальные объекты».

Таблица 2. Относительная плотность размещения S

Модель «виртуальные объекты»	0.727
Модель потенциальных контейнеров	0.810

Заключение

Предложена новая модель представления ортогональных объектов в контейнерах, описывающая все существующие свободные пространства размещаемых контейнеров. Проведенные исследования продемонстрировали эффективность разработанной модели потенциальных контейнеров и ее применимость для управления свободными пространствами контейнеров при решении задач ортогональной упаковки объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанов В.Г. Интегрированные производственные системы // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2008. № 1. С. 65-67.
2. Мухачева Э.А., Бухарбаева Л.Я., Филиппов Д.В., Карипов У.А. Оптимизационные проблемы транспортной логистики: оперативное размещение контейнеров при транспортировке грузов // Информационные технологии. 2008. № 7. С. 17-22.
3. Филиппова А.С. Моделирование эволюционных алгоритмов решения задач прямоугольной упаковки на базе технологии блочных структур // Информационные технологии. 2006. № 6. Приложение.
4. Чеканин В.А. Эффективное решение задачи двухмерной контейнерной упаковки прямоугольных объектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. № 6. С. 35-39.
5. Чеканин В.А., Ковшов Е.Е. Моделирование и оптимизация технологических операций в промышленном производстве на основе эволюционных алгоритмов // Технология машиностроения. 2010. № 3. С. 53-57.
6. Чеканин В.А., Ковшов Е.Е. Систематизация и анализ структур данных при автоматизации управления складом на основе генетических алгоритмов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2008. № 5. С. 42-51.
7. Чеканин В.А., Ковшов Е.Е., Хуэ Н.Н. Повышение эффективности эволюционных алгоритмов при решении оптимизационных задач упаковки объектов // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 3. С. 63-67.
8. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Исследование генетических методов оптимизации распределения прямоугольных ресурсов // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2012. С. 798-804.
9. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Оптимизация решения задачи ортогональной упаковки объектов // Прикладная информатика. 2012. № 4. С. 55-62.
10. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Эффективные модели представления ортогональных ресурсов при решении задачи упаковки // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5. С. 29-32.
11. Dyckhoff H. A typology of cutting and packing problems // EJOR. 1990. Vol. 44. P. 145-159.
12. Washer, G., Haubner, H., Shumann, H. An improved typology of cutting and packing problems // EJOR. 2007. Vol. 183. N. 3. P. 1109-1130.

УДК 625.655.3

А.А. Шестопалов

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ



Александр Андреевич Шестопалов, д. т. н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812) 552-67-26, E-mail: shestop-37@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены условия работы машин, предназначенных для уплотнения дорожных покрытий, устраиваемых из горячих асфальтобетонных смесей. Отмечены недостатки существующей технологии уплотнения таких материалов и пути возможного их устранения.
Ключевые слова: дорожные катки, асфальтобетонные покрытия, технология уплотнения

INCREASING STRENGTH AND STABILITY OF COMPOSITE MATERIALS USED ROAD CONSTRUCTION

A. A. Shestopalov

Dr. Alexander A. Shestopalov, e-mail: shestop-37@yandex.ru
St. Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

In this article the working conditions of the hot mix asphalt compaction machines have been examined and recommendations of setting their rational parameters have been given. The disadvantages of the current compaction technology of that materials have been considered and the improvement suggestions have been made.
Key words: road roller, asphalt pavement, compaction technology

Дорожная конструкция – это сложное инженерное сооружение, основными элементами которого являются земляное полотно и дорожное покрытие. Материалом для сооружения земляного полотна служат различные дисперсные грунты, а верхней части дорожного покрытия – чаще всего горячие асфальтобетонные смеси. Состояние и свойства таких дорожно-

строительных материалов как грунты, асфальтобетоны, находясь в сооружениях, изменяются во времени под действием нагрузок и погодно – климатических факторов. Срок службы такого сооружения зависит от прочности и устойчивости каждого из этих элементов дороги.

В последние годы, в связи с ростом интенсивности движения транспорта, появилась проблема колееобразования при плюсовых температурах дорожного покрытия в процессе его эксплуатации. Основными методами борьбы с этим «недугом» является улучшение свойств используемого при этом материала.

Улучшение свойств достигается двумя путями: формированием устойчивой структуры покрытия в процессе уплотнения и – путем подбора компонентов смеси соответствующего состава.

Грунты и асфальтобетонные смеси, в том числе приготовленные на основе модифицированных битумов, можно отнести к композиционным материалам. Для этих материалов характерны такие признаки, как сильно развитая межфазовая поверхность и высокая концентрация дисперсной фазы в жидкой дисперсионной среде. Жидкая дисперсная среда способствует формированию пространственной структуры композита, свойства которой в значительной степени определяются поверхностными явлениями на фазовых границах [2].

При общей схожести процессов формирования структур таких композитных материалов, под действием внешних нагрузок, они имеют существенные различия.

У грунтовых композитных материалов жидкой дисперсионной средой является вода или ее растворы. Такие среды подвержены тиксотропным явлением, структурные связи которых способны при механических воздействиях(вибрация, удар), разрушатся обратимо, восстанавливая их по мере прекращения внешнего воздействия. Для грунтовых композитов, такие процессы на границе двух фаз можно условно назвать «механической тиксотропией».

Для асфальтобетонов, которые также относятся к композитным материалам, где твердая фаза представлена полидисперсными минеральными частицами, а дисперсная среда представлена вяжущим – битумом или его модификацией в сильной степени определяются температурой среды, в которой находится этот материал. Его коагуляционные и коагуляционно-конденсационные структурные связи, а также поверхностные явления на межфазовых границах, в большей степени подвержены температурным воздействиям и способны обратимо разрушаться при их изменении. Эти процессы на межфазовых границах схожие с тиксотропными явлениями в грунтах и их можно назвать «температурной тексотропией».

Известно, что введение в битум, небольшого количества полимера существенно изменяются свойства вяжущего , а следовательно и всего асфальтобетонного композита. Это обусловлено структурой полимера, кото-

рая характеризуется разветвленной и переплетенной системой мономерных цепей.

Особо следует отметить влияние температуры на полимер. В обычном состоянии происходят тепловые колебания атомов с малой амплитудой относительно их средних положений . С ростом температуры, величина тепловой энергии становится достаточно большой для преодоления вторичных взаимодействий , и атомы могут двигаться более свободно , оставаясь стесненными только валентными связями и сплетениями. Здесь наблюдается достаточно широкий диапазон температур, при которой материал размягчается и проявляет вязкоупругие, резиноподобные свойства.

При этом, наиболее существенной особенностью поведения полимера является высокая обратимая деформация, которая определяется растяжением и раскручиванием полимерных цепочек. Эта возможность возникает в результате передвижений молекул на большие расстояния. Стабильность высокоэластичного состояния полимера зависит от степени переплетения молекул, а, следовательно, от молекулярного веса полимера. Поэтому битум, модифицированный полимером, в асфальтобетонном композите также проявляет эти свойства в процессе эксплуатации дорожного полотна.

Одновременно с этим, для повышения структурной устойчивости материала увеличивают внутреннее сопротивление асфальтобетонного композита , путем подбора соответствующего зернового состава минерального заполнителя. Такие работы были выполнены в свое время Н.В.Горелышевым [5].

Таким образом, за счет повышения внутреннего сопротивления асфальтобетонного композита, в пределах эксплуатационных температур и силовых воздействий, удается снизить накопление остаточных и увеличить упругую составляющую общей деформации дорожного покрытия.

Другим методом повышения прочности и устойчивости материалов, дорожной конструкции является их уплотнение. В процессе уплотнения формируется плотная, прочная и устойчивая структуру материала сооружения[1].

Вместе с тем, анализ структурообразования асфальтобетонного композита в процессе уплотнения показывает, что в результате существующих средств и технологии уплотнения мы получает материал дорожного покрытия с явно выраженными анизотропными свойствами. Асфальтобетонный композит является реологическим телом, наделенный такими свойствами как ползучесть , релаксация, анизотропией, он помнит предысторию его нагружения, т.е. обладает «памятью».

Поэтому, структура композита, находящегося в инженерном сооружении, в процессе эксплуатации будет сопротивляться только такому направленному силовому полю, которое сформировало его структуру в процессе уплотнения.

Уплотнение слоя горячего асфальтобетонного покрытия выполняется дорожными катками, рабочие органы которых выполненные в форме цилиндров, а образующая которых расположена перпендикулярно оси дорожного полотна. В результате чего они создают поверхностную силовую нагрузку в плоскости параллельной продольной оси дороги. Уплотнение производится возвратно поступательными движениями катков. Силы, действующие на поверхности уплотняемого слоя определяются вертикальной и горизонтальной составляющими, находящимися в одной плоскости. При этом вертикальная составляющая силового воздействия может быть постоянной или пульсирующей (в случае вибрационного катка) величиной. Горизонтальная составляющая может быть постоянной или пульсирующей (в случае осциллирующего вальца) , но разнонаправленной в зависимости от направления движения. Таким образом, формирование структуры в процессе уплотнения происходит в одной плоскости в направлениях *y-z* . Схема такого нагружения уплотняемого материала показана на рис. 1, А). В этой плоскости материал уплотняется и упрочняется за счет формирования различного вида структурных связей асфальтобетонного композита.

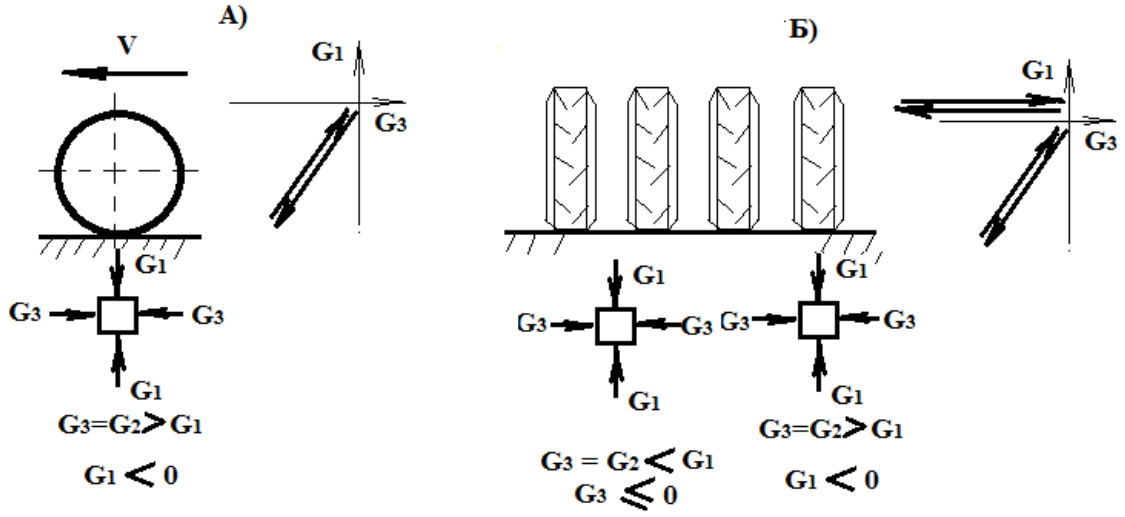


Рис. 1. Схема нагружения уплотняемого материала вальцовым А) и пневматическим Б) катками.

При этом, течение материала под действием направленной, ориентированной нагрузки, есть сумма молекулярных и агрегатных направленных перемещений или движений, которые поддерживаются напряжением. Напряжения имеют размерность энергии на единицу объема. При постоянном удлинении, происходит диффузия молекул и агрегатов из более напряженного состояния к менее напряженному, и этот процесс проявляется как релаксация напряжений. После снятия внешней нагрузки обратная диффузия в свою очередь приводит к возврату деформаций и возникновению дополнительных мимолетных зацеплений, которые временно повышают упругие

модули и прочность уплотняемого материала.

Установившееся течение этих процессов может быть определено, как непрерывная подстройка деформаций в соответствии с изменением напряжений на заданном уровне нагрузки.

Такое формирование структуры, в плоскости действия нагрузок, происходит постепенно до стабилизации прочностных свойств уплотняемого материала. При этом наблюдается упрочнение как жидкой фазы – вяжущего, так и структуры минерального заполнителя. В работах доказано [3],[4],если композит нагружать растяжением при температуре выше температуре стеклования, его молекулы растягиваются и ориентируются в направлении действия нагрузки и такая конфигурация может сохраняться после охлаждения композита. Прочность на растяжение при этом заметно увеличивается в направлении ориентации и несколько уменьшается в перпендикулярном ему направлении. Эта разница может достигать 5-ти кратного значения [4].

Аналогичная картина наблюдается и при формировании структуры минерального заполнителя. Хаотичное ориентирование частиц в неуплотненном состоянии в результате уплотнения эта ориентация становится упорядочена. При деформировании асфальтобетонного композита в процессе уплотнения происходит перестройка его структуры, заключающаяся в перекомпоновке частиц заполнителя и изменении их ориентации. Причем направление ориентации совпадает с направлением действия внешних сил, а их положение отвечает минимуму свободной энергии.

Недостатком такой структуры заключается в том, что формирование её в процессе уплотнения происходило под действием простого нагружения, когда вектор нагрузки действовал в плоскости движения катка, параллельной оси дорожного полотна.

В результате чего получаем анизотропное дорожное покрытие: прочное и устойчивое в направлении оси дорожного полотна и неустойчивое в направлении перпендикулярном оси дороги.

Вместе с тем, в процессе эксплуатации, дорожное покрытие подвергается разнообразным силовым воздействиям от движущегося транспорта, которые вызывают изгибные и сдвиговые деформации его в различных плоскостях.

Анализ этого силового поля показывает, что структура дорожного покрытия воспринимает нагрузку от транспорта, годограф суммарного силового вектора которого находится в разных плоскостях. При этом имеется проекция сил действующих в плоскости перпендикулярной продольной оси дороги. Эта составляющая не получает соответствующего сопротивления со стороны структуры дорожного покрытия в этом направлении. Что объясняется отсутствием силового воздействия, в этом направлении, в процессе ее формирования (уплотнения).

В результате чего под действием этих нагрузок начинается течение

материала в стороны от полосы наката и постепенное накопление остаточных деформаций, то есть образование колеи. Этому процессу способствуют и износ покрытия в результате проскальзывания колеса в процессе движения и наличие шипов на колесах машин. Однако основную роль в процессе образовании колеи играет анизотропная структура покрытия. Как отмечает С.С.Вялов «деформационная анизотропия проявляется при всякой упорядоченности текстуры, будь эта упорядоченность общей или внутри агрегатной » [3].

Следует отметить, что в данном случае меры по улучшению состава композита не могут исключить явление тиксотропии дорожного покрытия. Здесь необходимо изменять напряженно-деформированное состояние (НДС) материала, при котором формируется структура покрытия.

Из имеющихся средств уплотнения необходимое НДС может создавать только самоходный каток на пневматических шинах. Схема нагружения уплотняемого материала таким рабочим органом показана на рис.1, Б). Однако, подрядчики такие катки применяют лишь на отдельных этапах процесса уплотнения. Либо для «закатки» верхней неуплотненной части слоя, на завершающем этапе работ, либо вначале уплотнения, при высокой температуре материала, для его «подкатки». На этих операциях его влияние на формирование изотропного покрытия практически нет. Применение же этого катка как основного средства уплотнения , формирующего требуемую структуру материала не наблюдается. Это объясняется тем, что сейчас для дорожных покрытий с интенсивным движением транспорта, применяется жесткие щебеночно-мастичные асфальтовые смеси (ЩМАС). Эти смеси требуют повышенных нагрузок для их уплотнения. В результате чего, основным средством для их уплотнения являются вибрационные катки с гладкими металлическими вальцами, которые обеспечивают необходимые усилия на покрытие за счет вибратора.

Катки на пневматических шинах не используются для этих смесей в связи с небольшими усилиями которые передают их рабочие органы (пневматические колеса) на уплотняемый материал. Масса этих машин находится в пределах 16 – 30 тс. При числе пневматических колес до 9 (4-е передних и 5- задних) , суммарная площадь их контакта большая и давления на поверхности уплотняемого слоя невелики при таких массах. В этих случаях их масса должна быть увеличена в два – три раза. К сожалению, мировая практика не производит дорожные пнемокатки такой массы.

Здесь проблема может быть решена двумя вариантами. Первый- это значительно уменьшить скорость движения пневмокатка в процессе уплотнения. Недостатком этого предложения является снижение производительности катка.

Вторым вариантом - является выпуск катков массой 16-30 т с установленным на них вибратором. Как показал опыт японской фирмы SAKAI, впервые в мировой практике выпустившей вибрационный пневмокаток

GW – 750 массой 8,5 тс, который оказался эквивалентен по своей уплотняющей способности статическому средству массой 24 тс.

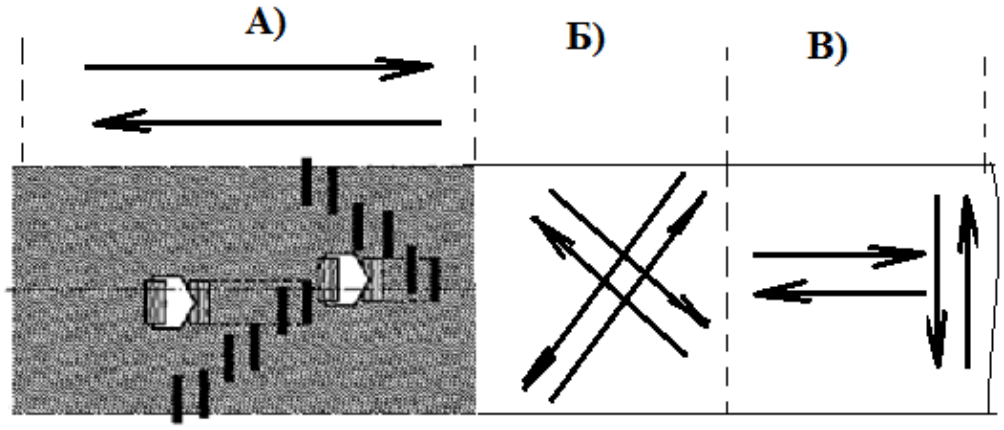


Рис. 2. Варианты технологических схем уплотнения дорожного покрытия: А) – существующая схема уплотнения; Б), В) – предлагаемые варианты уплотнения слоев асфальтобетонного дорожного покрытия.

Возможны и другие конструктивные варианты рабочих органов уплотняющих средств, создающих необходимое НДС уплотняемого слоя для формирования его прочной устойчивой, т.е. изотропной структуры.

Другим направлением получения изотропного покрытия является изменение существующей технологии уплотнения имеющимися средствами. С этой целью следует изменить направление движения средств уплотнения. Вместо существующего возвратно поступательного движения катков вдоль оси дороги (рис.2,а)), осуществлять диагональную укатку, либо последовательно - вдоль и поперек оси дорожного полотна. Схемы таких вариантов движения катков в процессе уплотнения показаны на рис. 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1975.
2. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
3. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: В.Ш.,1978.
4. Разрушение. Т.7, часть II, Органические материалы / под ред. Работнова Ю.Н. – М.: Мир, 1976.
5. Исследование асфальтобетона каркасной структуры и его эксплуатационных свойств в дорожных одеждах. Автореф. на соиск. уч. степ. д.т.н. – М.,1978.

УДК 624.078.45:621.791

А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРШИНЫ НЕПРОВАРА В КРЕСТОВОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ



Антон Юрьевич Шлепетинский,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (921)385-78-52, E-mail: antonshl@yandex.ru



Константин Павлович Манжула, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия,
E-mail: manshula@mail.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния в вершине непровара крестового соединения. Вершина концентратора представляется в виде полуокружности, а задача решается в упругой и упругопластической постановке. Получены инженерные зависимости для определения теоретического коэффициента концентрации напряжений и коэффициента концентрации упругопластических деформаций, градиентов напряжений и деформаций.

Ключевые слова: коэффициент концентрации напряжений, коэффициент концентрации деформаций, непровар, крестовое сварное соединение, градиент напряжений, градиент деформаций.

A.Y. Shlepetinskiy, K.P. Manzhula

MODE OF DEFORMATION ASSESSMENT AT THE ROOT OF CRUCIFORM WELD JOINT

Anton Y. Shlepetinskiy[1], e-mail: antonshl@yandex.ru;
Dr. Konstantin P. Manzhula[1], Prof., e-mail: manshula@mail.ru.
[1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia.

Abstracts

The results of research mode of deformation at the root of cruciform weld joint are presented. The tip of the concentrator is represented in the form of a

semi-circle, and the problem is set in elastic and elastic-plastic statement. The engineering equations for determination of stress and strength concentration factors, stress and strength gradients are received.

Key words: stress concentration factor, strength concentration factor, lack of fusion, cruciform weld joint, stress gradient, strength gradient

Усталостное разрушение металлоконструкций технологических машин, как правило, происходит по сварным швам. В ряде случаев выполнить полное проплавление корня шва в конструкции по технологическим причинам бывает невозможно. В стандартах представлены сварные соединения с непроварами – Т1, Т3, Т9 и др. Наличие конструктивного или технологического непровара в сварном соединении обуславливает концентрацию напряжений и деформаций. В зависимости от геометрии сварного соединения и прикладываемой нагрузки вершина непровара может стать источником разрушения элемента конструкции, рис.1, б.

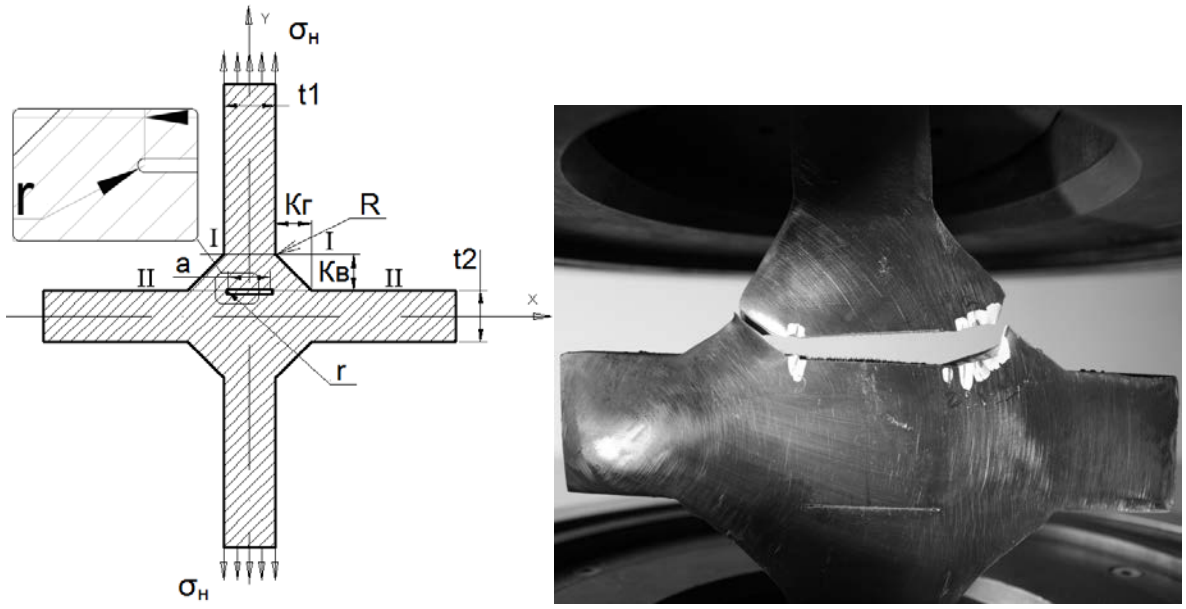


Рис. 1. а – геометрические параметры и схема нагружения крестового соединения; б – усталостное разрушение от вершины непровара в крестовом сварном соединении

В основном в угловых по форме сварных соединениях исследуется концентрация, вызванная радиусными переходами от основного металла к наплавленному. Как показывает практика, наиболее частое разрушение угловых соединений происходит от радиусного перехода. При этом рассматриваются коэффициенты концентрации напряжений, градиенты напряжений рассматриваются гораздо реже [1, 4, 5, 7 и др.]. Однако как показано в [2, 6] при определенном сочетании геометрических параметров концентра-

ция в вершине непровара оказывается больше, и разрушение соединения происходит от непровара.

Металл в вершине непровара может находиться в упругом $\sigma_{0.2} > \sigma_{max} > u$ или упругопластическом $\varepsilon_{max} > \varepsilon_{0.2}$ состоянии в зависимости от уровня номинального напряжения. Здесь u – нижний порог опасного по усталостному повреждению напряжения. При наличии пластической зоны в вершине непровара в прилегающей к ней упругой зоне $\sigma_{max} > u$ так же накапливаются повреждения. Количественно оценка напряженно-деформированного состояния проводится в упругой области теоретическим коэффициентом концентрации напряжений α_σ и относительным градиентом напряжений $\overline{G}_\sigma$, а в упругопластической области коэффициентом концентрации деформаций K_ε и относительным градиентом деформаций $\overline{G}_\varepsilon$, [3,4].

Анализ литературных источников выявил ограниченное число зависимостей для определения теоретических коэффициентов концентрации напряжений и отсутствие зависимостей для оценки градиентов и коэффициентов концентрации деформаций и напряжений в упругопластической области для крестовых соединений. В работе [1] представлены зависимости Радая (D. Radaj) и Лоренса (Lawrence) для расчета коэффициентов концентрации напряжений в вершине непровара, однако зависимостей для расчета градиентов напряжений и деформаций, коэффициента концентрации деформаций в работе не приводится.

В инженерной практике применяются зависимости коэффициентов концентрации и градиентов от геометрических параметров соединения. Для получения этих зависимостей в исследовании проводилась серия численных экспериментов с моделированием крестового сварного соединения с непроваром.

Для построения расчетных зависимостей были выделены наиболее значимые параметры геометрии с диапазоном варьирования, наиболее характерным для металлоконструкций подъемно-транспортных и строительных машин (табл. 1, обозначения по рис.1, а).

Таблица 1

Рассматриваемые значения геометрических параметров

Параметр	Рассматриваемое значение
Катет вертикальный Кв, мм	7; 10; 15;40
Форма шва Кв/Кг, мм	0,7; 1,0; 1,4
Толщина непровара d=2r, мм	0,5; 1; 1,5; 2
Толщина листа $t=t_1=t_2$, мм	10; 20; 40
Относительный размер непровара a/t	0,4; 0,7; 1,0
Номинальное напряжение $\sigma_н$, МПа	150; 200; 250; 300

Построение модели осуществлялось в среде конечно-элементного моделирования Ansys. В работе рассматривается плоская модель, расчетная схема и обозначения которой представлены на рис.1, а. Вершина непровара моделировалась полуокружностью. Окрестность вершины непровара разбивалась конечными элементами размером не более 0,02 мм, окрестность всего непровара – не более 0,2 мм, остальные площади модели – 2 мм.

Моделирование проводилось в упругой и упругопластической постановке. В упругой задаче задавались параметры материала модели – модуль упругости $E=2{,}1\cdot10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu=0{,}3$. В упругопластической задаче использовались параметры стали 09Г2С: $\sigma_{0,2}$=365 МПа, $\varepsilon_{0.2}$=0,002. Зависимость напряжений от деформаций при напряжениях выше предела текучести металла рассчитывалась по зависимости:

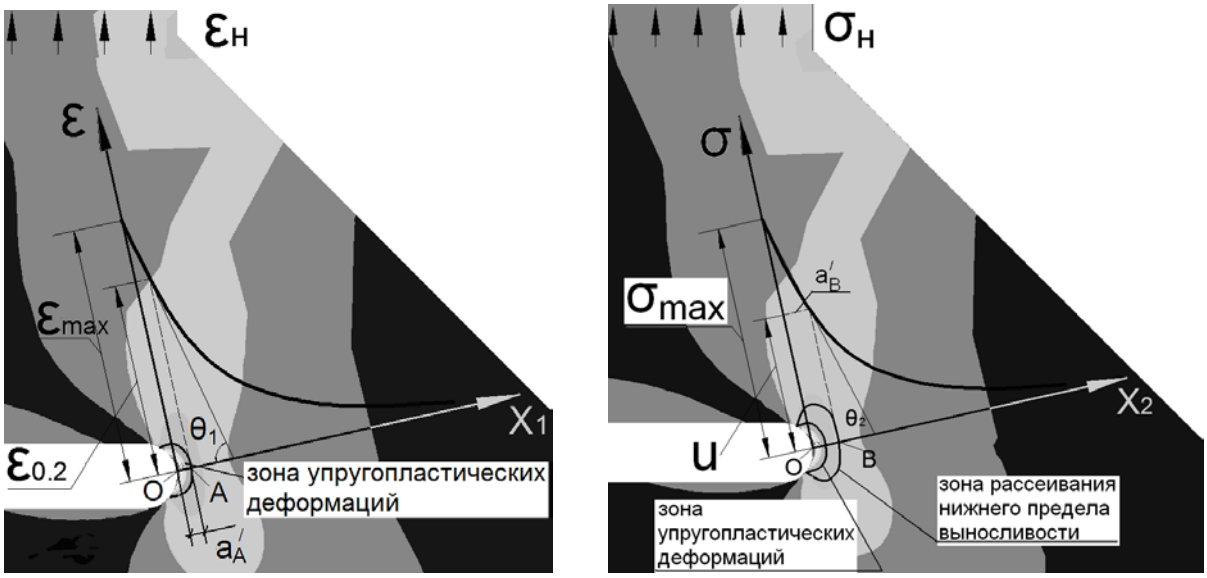
$$\sigma = \sigma_{0,2} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0.2}} \right)^{0,114} . \qquad (1)$$

Нагружение модели проводилось распределенной нагрузкой, прикладываемой согласно схеме (рис.1, а).

Коэффициенты концентрации определялись как $\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_н}$ и $K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_н}$. Абсолютные градиенты напряжений G_σ и деформаций G_ε характеризуют скорость убывания напряжений $G_\sigma = \frac{\sigma_{\max} - u}{a'_B} = tg\theta_2$ и деформаций $G_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{0.2}}{a'_A} = tg\theta_1$, рис. 2. Для того чтобы градиент зависел только от геометрических характеристик концентратора его приводят к относительному виду $\overline{G_\sigma} = \frac{G_\sigma}{\sigma_{\max}}$ и $\overline{G_\varepsilon} = \frac{G_\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}$, [3,4].

В модели определялись максимальные значения σ_{max} и ε_{max} – точка О на дуге окружности вершины непровара (рис. 2). Определялись координаты точки О – x_o, y_o. Положение точки А определялось в упругопластической задаче из двух условий: значение деформации в точке равно $\varepsilon_{0,2}$ и расстояние между точкой максимума деформации и точкой со значением $\varepsilon_{0,2}$ минимальное. Таким образом, линия X_1 (рис. 2), проведенная через точки О (x_o, y_o) и А (x_a, y_a), характеризуется как линия с наибольшей скоростью изменения деформации, т.е. линия наибольшего градиента деформации. Расстояние $a_A^{/}$ определялось по формуле $a'_A = \sqrt{(x_A - x_o)^2 + (y_A - y_o)^2}$. Положение точки В определялось при упругой постановке задачи по аналогич-

ному принципу, только вместо деформации $\varepsilon_{0,2}$ рассматривалось напряжение значением $u=0{,}5\sigma_{-1}$. Линия X_2, проходящая через точки О (x_o, y_o) и В (x_B, y_B), также характеризуется наибольшей скоростью изменения напряжения, т.е. является линией наибольшего градиента напряжения. Расстояние $a_B^{/}$ определялось по формуле $a'_B = \sqrt{(x_B - x_o)^2 + (y_B - y_o)^2}$.



а) б)

Рис. 2. а – схема к определению градиентов деформаций; б – и напряжений (показано на нагруженной модели с распределением напряжений и деформаций по Мизесу)

Для получения зависимостей коэффициентов концентрации и градиентов от геометрических параметров соединения использовались методики планирования многофакторного эксперимента. Было построено 24 расчетные модели для упругой и 24 для упругопластической области деформирования вершины непровара при варьировании нагружения. Было решено 192 задачи. Аппроксимация проводилась функцией в виде полинома второй степени.

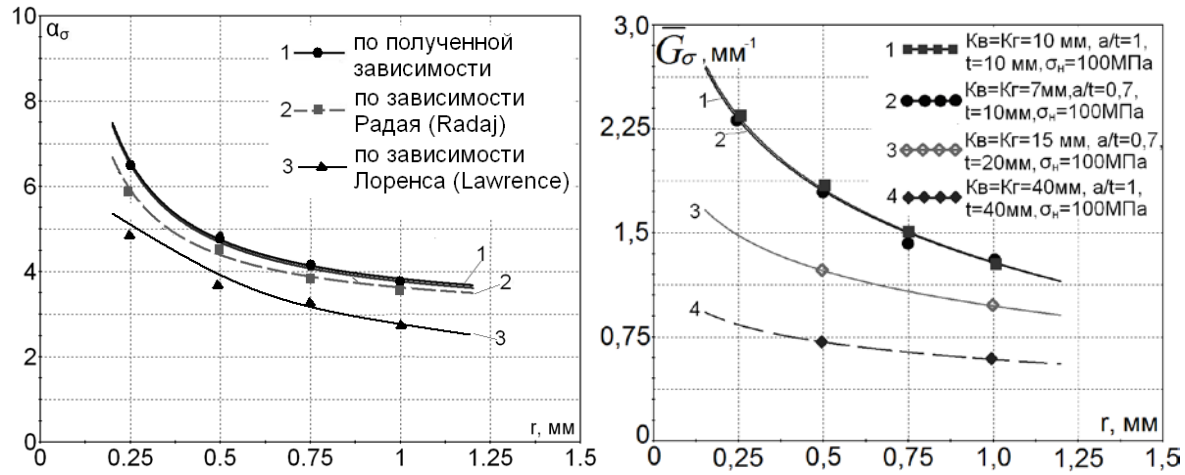
Зависимость для определения теоретического коэффициента концентрации напряжений имеет вид

$$\alpha_\sigma = 9{,}19 + r\cdot(-9{,}19 + 0{,}91K_B - 0{,}92K_\Gamma + 5r) +$$
$$+ 0{,}02K_B\cdot\left(-33{,}04 - 12{,}21\frac{a}{t} + 0{,}304t\right) + \frac{a}{t}\cdot(2{,}43 + 0{,}42t) +$$
$$+ 0{,}02K_\Gamma\cdot\left(47{,}41 - 7{,}78\frac{a}{t} + 1{,}72t - 2{,}21K_\Gamma\right) + 0{,}01t\cdot(-75{,}04 + 1{,}44t) \quad . \qquad (2)$$

Аналогичная зависимость для определения относительного градиента напряжений имеет вид

$$\overline{G_\sigma} = -1{,}064 + r\cdot\left(-1{,}553 - 0{,}587K_B + 0{,}658K_\Gamma - 0{,}962\frac{a}{t} - 0{,}047t + 0{,}009\sigma_H\right) +$$
$$+ 0{,}02K_B\cdot\left(-4{,}687 - 1{,}622t + 2{,}347K_B + 0{,}026\frac{a}{t} - 0{,}024\sigma_H\right) +$$
$$+ 0{,}02K_\Gamma\cdot\left(-31{,}69 - 2{,}77t + 2{,}91K_\Gamma - 0{,}0077\sigma_H\right) +$$
$$+ \frac{a}{t}\cdot\left(-4 + 0{,}615\frac{a}{t} + 0{,}0142\sigma_H\right) + 0{,}01t\cdot\left(193{,}605 + 0{,}0807\sigma_H - 4{,}187t\right) + \quad . \quad (3)$$
$$+ 0{,}004\sigma_H\cdot\left(-12{,}267 + 0{,}0138\sigma_H\right)$$

Анализ полученной зависимости (2) показал, что наибольшее влияние на коэффициент концентрации напряжений оказывает радиус вершины непровара. Также длина непровара существенно повышает концентрацию напряжений в вершине, причем при меньших значениях размера катета шва увеличение длины непровара более интенсивно увеличивает концентрацию. Сравнение полученной зависимости с зависимостью Радая (D. Radaj) и Лоренса (Lawrence) [1] показало близкий результат. Уменьшение радиуса вершины непровара увеличивает значение относительного градиента напряжений более интенсивно при малых толщинах свариваемых листов и катетов шва (рис.3, б).



а) б)

Рис. 3. а – влияние радиуса вершины непровара на коэффициент концентрации напряжений при t=10мм, K_Γ=K_B=10м, a/t=14; б – и относительный градиент напряжений

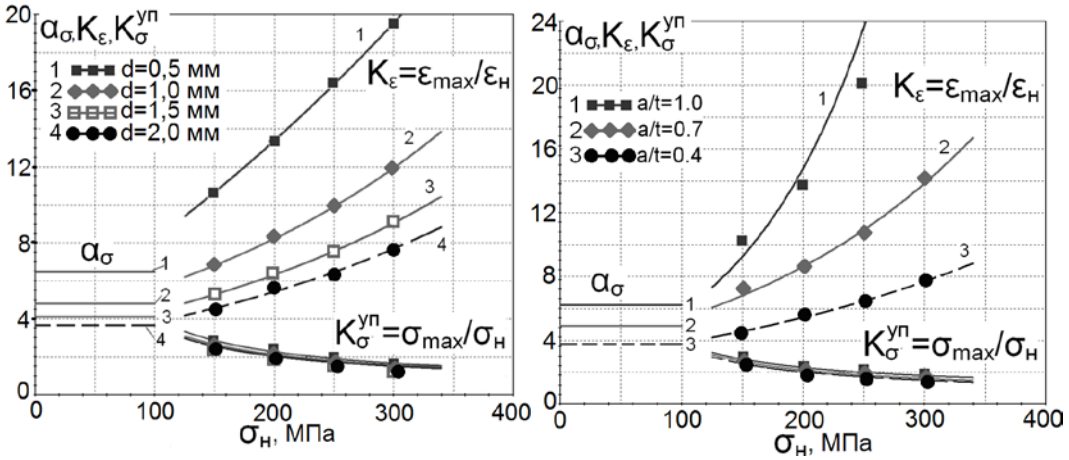
Полученная зависимость для коэффициента концентрации деформаций имеет вид

$$K_\varepsilon = r\left(-26{,}76+6{,}48K_B-8{,}07K_\Gamma+20\frac{a}{t}+1{,}14t-32{,}75\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}+15{,}64r\right)+$$
$$+0{,}02K_B\left(-320{,}56-1{,}95t+15{,}41K_B-6{,}88K_\Gamma-52\frac{a}{t}-273{,}8\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}\right)+$$
$$+0{,}02K_\Gamma\left(350{,}57-252{,}04\frac{a}{t}-30{,}39t+30K_\Gamma-59{,}9\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}\right)+$$
$$+\frac{a}{t}\left(-68{,}28+4{,}91t+24{,}23\frac{a}{t}+71{,}6\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}\right)+$$
$$+0{,}01t\left(795{,}9+700{,}69\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}-26{,}07t\right)+\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}\left(-102{,}13+55{,}45\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}\right) \quad . \quad (4)$$

Аналогичная зависимость для определения градиента деформаций имеет вид

$$\overline{G}_\varepsilon = 16{,}65+r\left(-3{,}14-1{,}2K_B+1{,}22K_\Gamma+2{,}81\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}\right)+$$
$$+0{,}02K_B\left(91{,}53-13{,}29\frac{a}{t}+1{,}12t-15{,}37\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}-2{,}63K_B+0{,}33K_\Gamma\right)+$$
$$+0{,}02K_\Gamma\left(-48{,}34+9{,}74\frac{a}{t}-0{,}33t+0{,}49K_\Gamma\right)+$$
$$+\frac{a}{t}\left(-8{,}4+0{,}13t+5{,}48\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}+1{,}73\frac{a}{t}\right)+$$
$$+0{,}01t\left(-151{,}06+35{,}38\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}+3{,}06t\right)-10{,}99\frac{\sigma_H}{\sigma_{0{,}2}}\cdot \quad . \quad (5)$$

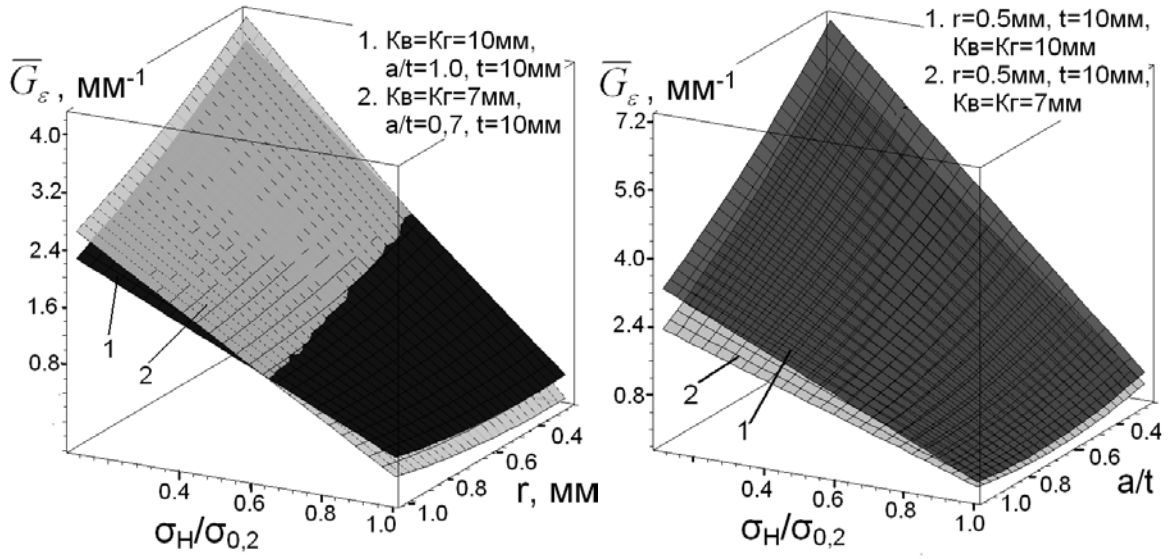
Коэффициент концентрации упругопластических деформаций K_ε значительно возрастает при уменьшении радиуса вершины непровара, уровня нагружения и увеличении длины непровара (рис. 4). Коэффициент концентрации упругопластических напряжений K_σ^{yn} в вершине непровара с ростом уровня нагружения уменьшается и поэтому не может служить характеристикой напряженно-деформированного состояния в упругопластической области.



а) б)

Рис. 4. а – влияние толщины непровара d на значения коэффициентов концентрации α_σ, K_ε, $K_\sigma^{уп}$ при a/t=1,0, t=10мм, $K_Г=K_В$=10мм: б – влияние относительной длины непровара a/t на значения коэффициентов концентрации α_σ, K_ε, $K_\sigma^{уп}$ при r=0,5мм, t=10мм, $K_Г=K_В$=7мм

Уменьшение радиуса r вершины непровара увеличивает значение относительного градиента $\overline{G}_\varepsilon$ деформаций более интенсивно при малых размерах катетов шва, поверхность 2, рис. 5, а.



а) б)

Рис. 5. а – влияние радиуса вершины непровара и уровня нагружения на относительный градиент деформаций; б – влияние длины непровара и уровня нагружения на относительный градиент деформаций

Полученные уравнения для расчета упругих и упругопластических коэффициентов концентрации и градиентов напряжений и деформаций учитывают конструктивно-технологическое исполнение соединений и могут быть использованы при расчетном анализе долговечности металличе-

ских конструкций мостов, подъемно-транспортных, строительно-дорожных машин, корпусов судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radaj, D. Fatigue assessment of welded joints by local approaches / D.Radaj, C.Sonsino, W.Fricke. - England: Woodhead Publishing Limited, 2006. – 660 p.
2. DNV-RP-C203. Fatigue Design of Offshore Steel Structures: Recommended practice // Det Norske Veritas. – Norway, 2011. – 142 p.
3. Манжула, К.П. Прочность и долговечность конструкций при переменных нагрузках: учеб. пособие. / К.П. Манжула, С.В. Петинов. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 76с..
4. Когаев, В.П. Расчет деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
5. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В.И. Труфякова. – Киев: Наук. думка, 1990. – 256 с.
6. Шлепетинский, А.Ю. Методика расчетной оценки долговечности металлоконструкций грузоподъемных и строительных машин с непроварами в сварных элементах: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.04/ Антон Юрьевич Шлепетинский. – СПб., 2012. - 24с.
7. Манжула, К.П., Штейнцайг, Л.К. Закономерности упругопластического напряженно- деформированного состояния в зонах концентрации сварных швов/ Труды ЛПИ.- 1988.- № 428.- С 75-79.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 669.295:620. 193:669.243

В.И. Болобов

ПРОБЛЕМА САМОВОЗГОРАНИЯ ТИТАНА В КИСЛОРОДЕ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ



Виктор Иванович Болобов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский горный университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)397-05-30, E-mail: boloboff@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрена негативная особенность титановых сплавов самовозгораться в кислородсодержащей среде, препятствующая их широкому применению в автоклавном оборудовании, работающему с использованием кислорода. Приведены основные положения теории возгорания металлов при разрушении с объяснением аномальной способности титана к самовозгоранию. Сделан вывод, что исключение самовозгорания титановых сплавов в кислородсодержащей среде автоклавов может быть достигнуто разработкой технических мероприятий, предотвращающих разогрев потенциальных мест трения титановых конструкций до температуры самовозгорания Т* сплавов при данных парциальных давлениях газообразных реагентов.

Ключевые слова: титановые сплавы, газообразный кислород, возгорание при разрушении, критические давление и температура, ювенильная поверхность, адсорбция.

V.I. Bolobov

PROBLEM OF SELF-IGNITION OF THE TITAN IN OXYGEN AND POSSIBLE WAYS OF HER DECISION

Dr. Viktor I. Bolobov, National Mineral Resources University, Russia
e-mail: boloboff@mail.ru

Abstract

In work is considered negative characteristics of titanium alloys spontaneous combustion in an oxygen environment, which prevents their widespread use in the autoclave equipment operating with oxygen. Are the basic tenets of the theory of metals in the destruction of fire with an explanation of the anomalous ability of titanium to spontaneous combustion. It is concluded that the exclusion

of self-ignition of titanium alloys in oxygen environment autoclaves can be achieved the development of technical measures to prevent the heating of the potential sites of friction titanium structures to self-ignition temperature T* alloys at these partial pressures of gaseous reactants.

Keywords: titanium alloys, oxygen gas, a fire in the destruction, the critical pressure and temperature, juvenile surface, adsorption.

Постановка задачи

В силу своей доступности и высокой окислительной способности газообразный кислород нашел широкое применение в различных областях техники, в частности, в автоклавных процессах при переработке руд цветных и благородных металлов [1]. Для повышения скорости и более полного окисления реагентов эти процессы проводят при повышенных температурах и максимально возможном давлении кислорода или кислород-воздушной смеси (КВС). Для интенсификации процесса насыщения пульпы кислород или КВС подают под механические мешалки автоклавов.

Проведение указанных процессов при повышенных температурах и давлениях с использованием высоко агрессивных и абразивных сред выдвигает повышенные требования к химической стойкости и прочностным свойствам используемых конструкционных материалов реакторного оборудования, в наибольшей степени которым удовлетворяют титан и сплавы на его основе. Эти материалы отличаются высокой коррозионной стойкостью в сернокислых, солянокислых и хлорсодержащих средах, имеют однородный характер коррозии сварных швов. Достаточно высокие жаропрочность и термостойкость, хорошая устойчивость против эрозии при повышенных температурах позволяют использовать титан и его сплавы в качестве материалов реакторного оборудования при температурах до 250^{o}C [1].

Однако, при всех своих положительных качествах, титановые сплавы обладают одной важной негативной особенностью, препятствующей их широкому применению в автоклавных процессах, проводимых с использованием кислорода. Она заключается в потенциальной угрозе выхода титанового оборудования из строя, вследствие аномальной способности титана и его сплавов в определенных условиях самовозгораться в кислородсодержащей среде. Случаи самовозгорания титановых клапанов и импеллеров мешалок в кислороде имели место, как при лабораторных исследованиях, так и на стадии опытно-промышленных испытаний автоклавов. Например, при окислительном выщелачивании никель-кобальтового штейна [1], при создании гомогенного реактора компанией Union Carbide Nuclear Corporation [2, 3], в автоклаве низко-кислотного выщелачивания цинка из сфалеритового концентрата на заводе компании Hudson Bay Mining and Smelting (HBM&S) [4], а также при освоении автоклавной технологии в опытном цехе Норильского ГМК. В последних случаях возгорания были вызваны нарушениями технологических инструкций по эксплуатации автоклавного оборудования, причем конкретная причина возгорания не была

установлена.

Большие экономические потери в результате самовозгорания, а также кажущиеся случайность и необъяснимость этого явления послужили причиной того, что к настоящему времени в подавляющем большинстве технологий цветной металлургии с использованием кислорода и КВС применяют автоклавы, изготовленные из высоколегированных хромоникелевых сталей и сплавов, подвергающихся гораздо более сильному коррозионному, абразивному и кавитационному износу по сравнению с титаном. Это существенно ограничивает срок службы оборудования, снижает его производительность и ухудшает технико-экономические показатели.

К настоящему времени работами отечественных (Николаева С.А., Зашихина Т.Н., Борисова Е.А., Барданов К.В., Дерябина В.И., Колгатин Н.Н., Лукьянов О.П. и др.) и зарубежных (Littman F.E., Church F.M., Kinderman E.M., Jackson J.D., Boyd W.K., Miller P.D и др.) ученых установлено, что самовозгорание титана и его сплавов в кислороде может произойти только при разрушении металла, пусть даже в самом поверхностном слое, с появлением ювенильной (свежеобразованной) металлической поверхности. При этом для возгорания того или иного сплава требуется свое, определенное минимальное давление кислорода – *критическое давление возгорания* P*. Поскольку при работе автоклавов, особенно с движущимися частями, нельзя полностью исключить возможность появления такой поверхности (например, в результате трения или задира), угроза самовозгорания оборудования из титана и его сплавов может быть исключена только при понимании механизма процесса возгорания металлов при разрушении и влияния на его критические параметры условий эксплуатации оборудования.

Ниже приводятся основные положения теории [5] возгорания металлов при разрушении с объяснением аномальной способности титана к самовозгоранию в кислороде и разработкой заключения об условиях безопасной эксплуатации этого материала.

Основные положения теории самовозгорания металлов

Разогрев фрагментов разрушения, как ключевой фактор, объясняющий самовозгорание металлов

При установлении возможного механизма самовозгорания руководствовались известным фактом [6, 7], что при пластической деформации металлов, вне зависимости от вида воздействия, подавляющая часть работы (более 90%) переходит в тепло. Учитывая, что разрушение является завершающей стадией пластической деформации, считали, что подавляющая часть работы A_p, затрачиваемой на разрушение металла, переходит в тепло Q, которое выделяется в разрушаемом объеме и частично (или полностью) расходуется на нагрев фрагментов разрушения. По этой причине при разрушении возгоранию подвергаются фрагменты, уже разогретые к моменту взаимодействия с кислородом до температуры T*, представляющей собой

сумму начальной температуры T_0 и разогрева ΔT за счёт тепла, выделившегося в разрушаемом объеме

$$T^* = T_0 + \Delta T . \quad (1)$$

При этом, температура T* есть *критический параметр*, характеризующий склонность металла к самовозгоранию, связанный с величиной другого критического параметра - *давления возгорания* P*.

Анализировали разогрев ΔT фрагментов разрушения титановых сплавов при разрыве образцов при растяжении. При этом количество тепла Q, выделяющееся при разрушении, приравнивали к работе разрушения A_p

$$Q = k\, A_p \ , \quad (2)$$

где k – коэффициент, характеризующий долю работы A_p, перешедшей в тепло.

Работу A_p выражали в виде произведения разрушающей нагрузки P на путь dL, на протяжении которого она совершается. При представлении разрушаемого объема в виде $V=F\cdot dL$ (где F – площадь сечения образца в месте разрыва) удельная работа разрушения равна

$$A_p/V = P\cdot dL/F\cdot dL = P/F = S_k , \quad (3)$$

где S_k – истинное разрушающее напряжение.

Предполагали, что разрушение образца на завершающей стадии происходит практически мгновенно и отдельные фрагменты разрушения с затрудненным теплоотводом подвергаются за счет выделившегося тепла Q адиабатическому разогреву, величина которого с учетом (2,3) может быть рассчитана по формуле

$$\Delta T \cong k\, S_k /\rho\cdot \bar{c}_p \ , \quad (4)$$

где ρ, $\bar{c}_p$ – плотность и среднее значение теплоёмкости разрушаемого металла в интервале температур $T_0 - T^*$.

Значения S_k рассчитывали по величинам $\sigma_в$ (условный предел прочности) и ψ (относительное сужение) анализируемых сплавов

$$S_k = \sigma_в\cdot(0{,}8 + 2{,}06\cdot\psi) \ . \quad (5)$$

Расчетные данные сопоставляли с результатами экспериментов, проведенных автором при одноосном растяжении до разрыва цилиндрических образцов различных титановых сплавов в газообразном кислороде (табл.).

Как свидетельствуют результаты расчета, фрагменты разрушения образцов всех анализируемых сплавов способны подвергаться значительному саморазогреву (ΔT до 470К), величина которого индивидуальна для каждого сплава. Эти обстоятельства объясняют отмеченное в литературе влияние на величину P* различных факторов, в частности, состава сплавов и скорости появления ювенильной поверхности.

Так из таблицы видно, что с увеличением температуры T* (с 682 до 770К), до которой способны саморазогреться фрагменты разрушения сплавов, давление кислорода P*, необходимое для их возгорания, монотонно убывает (с 2,9 до 0,7МПа). Для постоянной температуры испытаний (T_0=293К) подобным образом с P* коррелирует и величина разогрева образцов: с возрастанием ΔT с 405 до 470К давление возгорания сплавов

убывает с 2,3 до 0,9МПа. Поскольку значение ΔТ материалов определяется работой разрушения образца, а та, в свою очередь (4), величиной разрушающего напряжения, результаты таблицы свидетельствуют о существовании зависимости критического давления возгорания Р* от прочностных свойств сплава: чем выше напряжение, необходимое для разрушения образца, тем меньше давление кислорода, при котором воспламеняются фрагменты разрушения. По этой причине иодидный титан, характеризующийся наименьшей из титановых сплавов прочностью ($S_k \cong 550$МПа при T_0=293К) и, как следствие, подвергающийся при разрушении наименьшему разогреву, отличается наивысшей стойкостью к самовозгоранию (Р*=7,5МПа [8]). С введением в состав титана легирующих элементов, повышающих прочность материала, величина ΔТ фрагментов разрушения возрастает, что приводит к снижению давления кислорода, при котором эти фрагменты возгораются.

Таблица. Расчетные значения S_k, ΔТ, Т* титановых α-сплавов в сопоставлении с экспериментально установленными значениями критического давления возгорания Р* сплавов в кислороде при различных температурах испытаний T_0

Марка сплава	T_0,К	Р*,МПа	$\sigma_в$,МПа	ψ	S_k, МПа	ΔТ,К	Т*,К
ВТ1-0	473	2,9	250	0,73	576	209	682
ВТ1-0	293	2,3	470	0,73	1083	405	698
Ti-15Zr	293	1,6	540	0,65	1155	449	742
ОТ4-1	293	1,5	680	0,44	1160	442	735
ПТ17	293	1,1	925	0,26	1235	455	748
ПТ3В	293	0,9	770	0,41	1266	470	763
ОТ4-1	473	0,7	450	0,56	879	297	770

С другой стороны при проведении расчетов ΔТ предполагали, что заключительная фаза разрушения образца протекает практически мгновенно, вследствие чего отдельные фрагменты разрушаемого объема способны подвергаться адиабатическому разогреву. Естественно, при малой скорости появления ювенильной поверхности, что имеет место при растяжении образцов без разрыва, указанные условия не выполняются и тепло выделяющиеся при пластической деформации рассеивается в окружающую среду. По этой причине пластическая деформация образцов титановых сплавов при растягивающих напряжениях, меньших разрушающих, хотя и сопровождается образованием ювенильной поверхности, не приводит к возгоранию материалов при весьма существенных давлениях кислорода (например, для сплава ВТ5-1 при РО2 до 10 МПа [8]). Недостаточная скорость появления фрагментов с ювенильной поверхностью характерна и при испытании титановых пластин в кислороде высокого давления на изгиб, когда возгорание металла наблюдается только в случае образования излома [9].

Количественная связь между критическими параметрами T и P* при возгорании*

Экспериментально установленный факт влияния величины давления кислорода на склонность металлов к самовозгоранию указывает, по мнению автора, на то, что лимитирующей стадией взаимодействия в этом случае является химическая адсорбция кислорода на ювенильной поверхности образовавшихся фрагментов разрушения. Скорость взаимодействия пропорциональна для кислорода, как для двухатомного газа, $\sqrt{P}$ и описывается для различных температур уравнением

$$\frac{\partial m}{\partial t} = K_0 \cdot \left(P/P_{0,1}\right)^{0,5} \cdot \exp\left(-E/RT\right), \text{ кг}_{O2}/(\text{м}^2\cdot\text{с}) , \qquad (6)$$

где K_0, E – предэкспонент и энергия активации уравнения Аррениуса скорости адсорбции O_2 на ювенильной поверхности металла при давлении кислорода $P_{0,1}$= 0,1МПа, а условия возгорания фрагментов определяются критическими условиями теории теплового взрыва Семенова-Франк-Каменецкого [10] для гетерогенной реакции

$$\delta_{кр} = \frac{Q}{\alpha} \cdot \frac{K_o \cdot E}{R \cdot \left(T^*\right)^2} \cdot \left(\overline{P}\right)^{0.5} \cdot exp(-E / RT^*) = \frac{1}{e}, \qquad (7)$$

где Q – удельный тепловой эффект взаимодействия кислорода с металлом на ювенильной поверхности (принимался равным теплоте образования соответствующего оксида); α – суммарный коэффициент теплоотдачи от фрагмента разрушения; $\overline{P} = P^*/P_{0,1}$.

Проверку соответствия параметров T*, P* материалов критериальному уравнению (7) проводили с использованием экспериментально установленных автором зависимостей P*=f(T*) для титановых сплавов (табл.) и железа [11] при растяжении образцов до разрыва, а так же железа и нержавеющей стали при разрыве трубок давлением кислорода (результаты на рис. 1). Для получения истинной температуры (T*) к значениям температур T_0 рис. 1 приплюсовывали соответствующие расчетные значения разогрева ΔT, составляющие, как оказалось, до 15% от величины T_0. При проведении расчетов предполагали, что для всех исследованных титановых α-сплавов кинетические параметры уравнения скорости взаимодействия их ювенильной поверхности с кислородом близки между собой, а α=const (P). После логарифмирования и группировки переменных уравнение (7) имело вид

$$0{,}5 \ln \overline{P} - 2 \ln T^* - B / T^* + A = 0, \qquad (8)$$

где B = E/R; A = ln (Q·K0 e·E / R / α), из чего можно было заключить, что зависимость $(0{,}5\ln \overline{P} - 2\ln T^*) = f(1/T^*)$, построенная по значениям P*, T* из табл. и рис. 1, должна представлять прямую линию с тангенсом угла наклона B, что, как следует из рис. 2, действительно имеет место. Это может служить подтверждением, что условия возгорания металлов при разрушении действительно характеризуются двумя критическими параметрами T*, P* и описываются уравнением теплового взрыва.

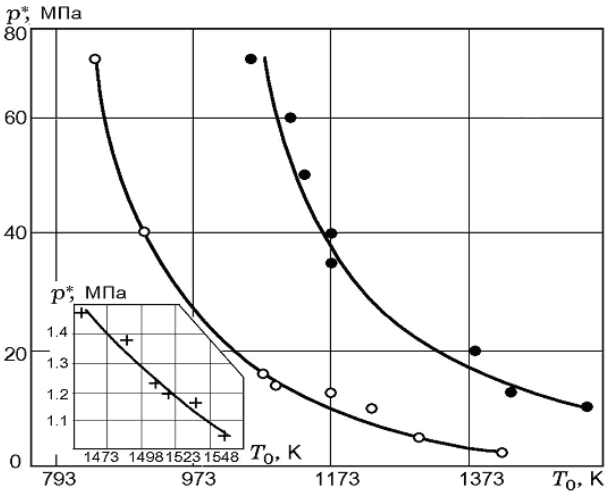


Рис. 1. Критическое давление возгорания P* материалов, как функция от температуры испытаний T0: - техническое железо (°), сталь 12Х18Н10Т (•) - разрушение трубок давлением кислорода; - техническое железо (+) - разрыв цилиндрических образцов при одноосном растяжении в продуктах разложения N2O [11]

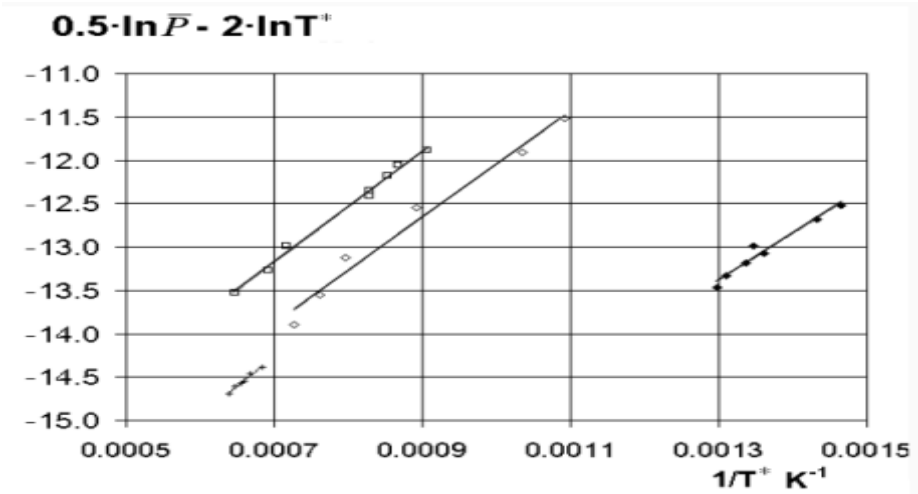


Рис. 2. Аппроксимация расчетно-экспериментальных значений критических параметров P*, T* зависимостью критериального уравнения теории теплового взрыва: + - техническое железо в O2-содержащей смеси; ◊ - техническое железо, □ - нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, ♦ - титановые α-сплавы в O2

Природа и условия теплообмена инициаторов возгорания

На основании результатов фрактометрических наблюдений изломов титановых сплавов и технического железа было сделано заключение, что первичными инициаторами самовозгорания материалов являются микрофрагменты разрушения величиной порядка размера зерна металла (5-20мкм), находящиеся в наиболее затрудненном теплообмене с основной массой образца (рис. 3). При этом их возгорание, как при растяжении образцов до разрыва, так и при разрыве трубок давлением среды, происходит

в одних и тех же условиях теплообмена: в момент, когда фрагменты еще находятся в узкой непроточной трещине разрушения, заполненной кислородом рабочего давления (рис. 4).

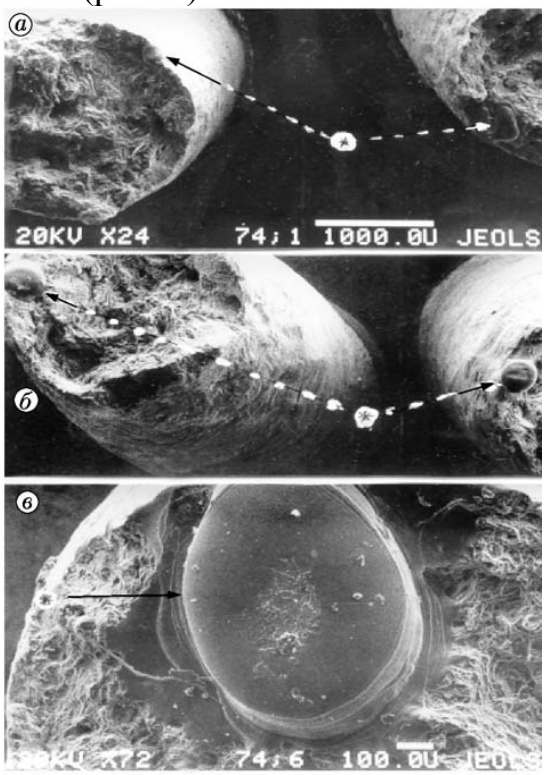


Рис. 3. Микрофрактограмма поверхности половинок образца сплава ОТ4-1 после его разрыва в кислороде при различном давлении (* – потухший очаг возгорания): а – Р = 1,4 МПа, Х 24; б – Р = 1,6 МПа, Х 24; в – Р = 2,1 МПа, Х 72

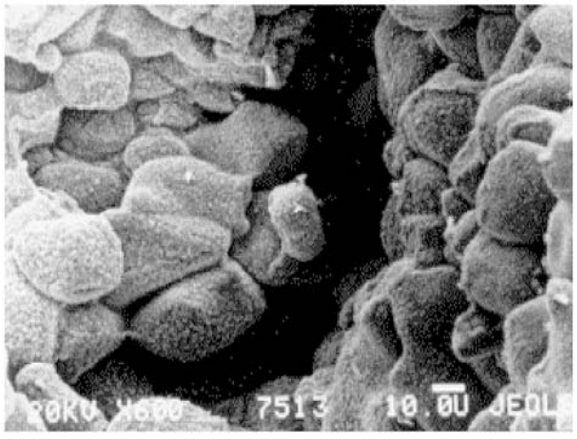


Рис. 4. Вид зерен металла на поверхности трещины разрушения трубчатого образца нержавеющей стали (Т = 1373 К, РО2 = 20 МПа (Р = Р*), Х 600)

По этой причине значения суммарного коэффициента теплоотдачи α для обоих анализируемых способов разрушения рассчитывали по формуле (9) для узких непроточных зазоров

$$\alpha \cong \alpha_{\alpha} \cong \lambda_{gP} / X, \quad (9)$$

где X- средний размер ячейки поверхности разрушения, установленный фрактометрическим способом (~10мкм для образцов титановых сплавов, ~20мкм для железных и стальных трубок, ~70мкм для образцов железа), λ_{gP}- теплопроводность кислорода при P*, T*.

Кинетические параметры уравнения скорости адсорбции кислорода на ювенильной поверхности металлических материалов

Уравнение (4) после подстановки значений P*, T*, α, Q решали по методу наименьших квадратов, в результате чего были рассчитаны параметры уравнения Аррениуса для скорости адсорбции кислорода на ювенильной поверхности металлических материалов при P_{O2} = 0,1МПа:
E = 56,4±9,2 кДж/моль (13,5±2,2ккал/моль), K_0=0,72±0,1кг$_{O2}$/м^2/с и E=50,94±10,4кДж/моль (12,2±2,5ккал/моль), K_0=1,17±0,2 кг$_{O2}$/м^2/с – для железа в O_2-содержащей смеси и чистом кислороде, соответственно;
E=52,9±4,4кДж/моль (12,6±1,1ккал/моль), K_0=0,54±0,04 кг$_{O2}$/м^2/с – для Cr-Ni стали в O_2;
E = 44,5±10,5 кДж/моль (10,6±2,5 ккал/моль), K_0 = 8,3±1,6 кг$_{O2}$/м^2/с – для титановых α-сплавов в O_2.

Вне зависимости от способа разрушения образцов полученные значения энергии активации для всех материалов близки между собой и имеют порядок, характерный для процесса хемосорбции кислорода на металлах (11,5ккал/моль–для Ta, 14,2–для Nb, 17,6–для V [12]) и их оксидах (13,8 ккал/ моль для Fe_2O_3 [13]), что подтверждает гипотезу о лимитирующей стадии адсорбции кислорода в процессе возгорания металлов при разрушении.

Из сопоставления значений кинетических параметров видно, что величина предъэкспонента K_0 для титановых сплавов существенно выше, а энергия активации E ниже, чем у остальных исследованных материалов, что обеспечивает при одной и той же температуре значительно большую скорость взаимодействия кислорода с ювенильной поверхностью титана. Так, например, при T = T*$_{BT1\text{-}0}$ = 682 K величины ∂m/∂t титана и железа при P_{O2} = 0,1 МПа соответственно равны 1,2 10^{-3} и 5,5 10^{-5} кг$_{O2}$/м^2/с. Это обстоятельство, а также аномально высокие растворимость кислорода в титане (14,5% масс. по сравнению с 10^{-1} - 10^{-3}% для других металлов) и сопутствующий этому тепловой эффект (в 6 раз превышающий значение Q для железа), объясняют уникальную способность титана и его сплавов к возгоранию при разрушении в кислородсодержащей атмосфере.

Пути решения проблемы

В соответствии с предлагаемой теорией возможность возгорания титановых сплавов (как и других металлических материалов) в кислороде

при разрушении определяется достижением критических условий, при которых каждому значению давления кислорода Р соответствует своя температура Т* фрагментов разрушения (вне зависимости от того, за счет чего достигнута Т*) и наоборот. В этой связи, для предотвращения возгорания титановых конструкций в условиях трения необходимо исключить ситуацию разогрева их трущихся частей до температуры Т*, соответствующей данному парциальному давлению кислорода.

Что касается установления критической температуры возгорания Т* титановых сплавов, то ее значения для того или другого парциального давления кислорода P_{O2} в смеси могут быть рассчитаны по формуле (10) из [14]

$$\frac{1{,}44 \cdot 10^{-9} \cdot \left(T^*\right)^2}{\exp\left(-\frac{5300}{T^*}\right)} = \frac{\left(P^*_{O_2}\right)^{0,5}}{1 + 0{,}52 \cdot P^{0,5}_{N_2,H_2O}}, \qquad (10)$$

где Т* – температура в К, $P^*_{O_2}$, P_{N_2,H_2O} – парциальные давления реагентов в МПа.

Так, предельному значению парциальных давлений кислорода в кислород-воздушных смесях автоклавных процессов выщелачивания цветных металлов (1,0 МПа при предельном содержании O_2 в смеси 23%) в соответствии с этой формулой отвечает критическая температура ювенильной поверхности Т* равная 520^0С. Соответственно до этой температуры и недопустим разогрев потенциальных мест трения титановых элементов.

Необходимо подчеркнуть, что значения всех коэффициентов, входящих в уравнение (10), установлены в [7, 14], исходя из значений критических параметров Т*, Р* различных произвольно взятых титановых сплавов, и являются, следовательно, для них всех общими. По этой причине можно предположить, что это уравнение является справедливым для всех титановых сплавов вне зависимости от их марки.

Таким образом, можно заключить, что исключение самовозгорания титановых сплавов в кислороде в автоклавах с перемешивающими устройствами может быть обеспечено разработкой технических мероприятий, предотвращающих разогрев потенциальных мест трения титановых конструкций до температуры самовозгорания Т* сплавов при данных парциальных давлениях газообразных реагентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Набойченко С.С., Ни Л.П., Шнеерсон Я.М., Чугаев Л.В. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов. Под редакцией члена-корреспондента РА С.С. Набойченко. Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. 940 с.

2. Littman F.E., Church F.M., Kinderman E.M. A study of metal ignitions. The spontaneous ignition of titanium // J. Less-Common Metals, 1961, v.3, p. 367-378.
3. Littman F.E., Church F.M., Kinderman E.M. A study of metal ignitions. The spontaneous ignition of zirconium // J. Less-Common Metals, 1961, v.3, p. 378-397.
4. Barth T.R., Hair A.T.C., Meier T.P. (Hudson Bay Mining and Smelting Company, Ltd P.O. Box 1500, Flin Flon, Manitoba R8A 1N9). Zinc and Lead Processing The Metallurgical Society of CIM, 1998.
5. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Мир, 1969. 220 с.
6. Лариков Л. Н., Юрченко Ю. Ф. Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник. Тепловые свойства металлов и сплавов. Киев. Навукова думка, 1985. 350 с.
7. Болобов В.И., Подлевских Н.А. Теория возгорания металлов при разрушении // Физика горения и взрыва. 2007, Т. 43, № 4. С. 39-48.
8. Борисова Е.А., Барданов К.В. Загорание титановых сплавов в кислородсодержащих средах // Металловедение и термическая обработка металлов. 1963. № 2. С. 37-40.
9. Дерябина В.И., Колгатин Н.Н., Лукьянов О.П. и др. Возгорание низколегированного титанового α-сплава при разрыве в кислородсодержащих газах // Физико-химическая механика материалов. 1971. № 1. С.16-19.
10. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Наука, 1987.256 с.
11. Болобов В. И., Макаров К. М., Штейнберг А. С., Дрожжин П. Ф. О возгорании компактных образцов при появлении ювенильной поверхности металла // Физика горения и взрыва. 1992, Т. 28, № 5. С. 8-11.
12. Фромм Е., Гебхардт Е. Газы и углерод в металлах. М., Металлургия,1980.470 с.
13. Benard J.,Telbot J. Sur la cinetique de la reaction d`oxydation du fer dans sa phase initiale. // Compt. rend., 1948, 226, 11, p. 912-914.
14. Болобов В. И. К расчету критического давления возгорания титановых сплавов в парогазовых смесях автоклавов // Цветные металлы. 2011, № 10. С. 94-97.

УДК 655.1

В. В. Ваганов, Д. С. Андреев, А. В. Мовчан

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ “WEB TO PRINT” В ИЗДАТЕЛЬСТВАХ И ТИПОГРАФИЯХ ВУЗОВ



Вячеслав Владимирович Ваганов, к.т.н, профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 294 4215, E-mail: prvaganov_spb@mail.ru



Дмитрий Сергеевич Андреев
ООО “Канон Ру”
Руководитель отдела продаж
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921) 939 98 72, E-mail: dmitry.andreev@canon.ru



Артем Витальевич Мовчан, студент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921) 658 55 96

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы, связанные с организацией и применением нового подхода к процессу печати. Технология “Web to print” успешно используется для повышения эффективности и снижения затрат на полиграфических предприятиях. Данная технология уже успешно применяется за рубежом и постепенно внедряется на крупнейшие предприятия РФ.

Результаты показали, что применение данной технологии может позволить увеличить пропускную способность типографии на 25-30%, а затраты на основные расходные материалы снизить на 12-15%.

Ключевые слова: технология “web to print”, информационные технологии, print on demand, эффективность полиграфического производства.

V. V. Vaganov, D. S. Andreev, A. V. Movchan

APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGY “WEB TO PRINT” IN PRINTING HOUSES AND PUBLISHERS OF UNIVERSITIES

Prof. V.V. Vaganov[1], e-mail: prvaganov_spb@mail.ru;
Dmitry S. Andreev[2], e-mail: dmitry.andreev@canon.ru;
Artem V. Movchan[1],
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia
[2]Ltd. "Canon RU"

Abstract

In this article discussed questions concern with organization and application of a new approach to printing. Technology "Web to print" has been successfully used for improving the efficiency and reduction the cost on printing companies. This technology has already been successfully used abroad and gradually introduced in largest enterprises of Russia.

The results showed that the application of this technology can increase the capacity of printing by 25-30% and reduce the cost of basic supplies by 12-15%.

Key words: technology "web to print", information technology, print on demand, the efficiency of printing production.

На сегодняшний день автоматизация производства занимает одно из важнейших мест в вопросах, связанных с организацией производства. С развитием таких технологий, как “print-on-demand”, спрос на оперативное и качественное выполнение заказов возрос. Появление термина “Web to print” не случайно. Данная технология – это логическая ступень развития печати по требованию. В ВУЗах активно используется цифровая печать для малого и среднего тиражирования как текстовой, так и графической информации. С использованием Web to print, возможно значительное повышение эффективности производства, что не маловажно при работе с большим объемом печатных наименований, в то время, когда их тиражи снижаются.

Web to print включает в себя множество технических и технологических переходов, которые объединяются одной или несколькими логически-связанными системами, позволяющие соединить все процессы производства воедино и сократить переходы между ними. Стандартная схема изготовление тиража изображена на схеме 1. На ней видно, что заказ поступает к менеджеру, а далее, если требуется, к дизайнеру, который либо корректирует макет заказчика, либо создает новый. При получении пригодного к печати макета, он согласуется через менеджера с заказчиком и только после этого отправляется на производство.

После прохождения всех стадий производства, тираж через менеджера передается заказчику. Такова типовая структура выполнения заказа.

Когда речь идет об использовании технологии Web2Print, то появляется некая Web-система (схема 2), которая включает в себя как сайт с набором шаблоном, так и различное ПО для создания тех. карт, договоров и

т.д., что, несомненно, упрощает диалог между различными звеньями производства и с самим заказчиком.

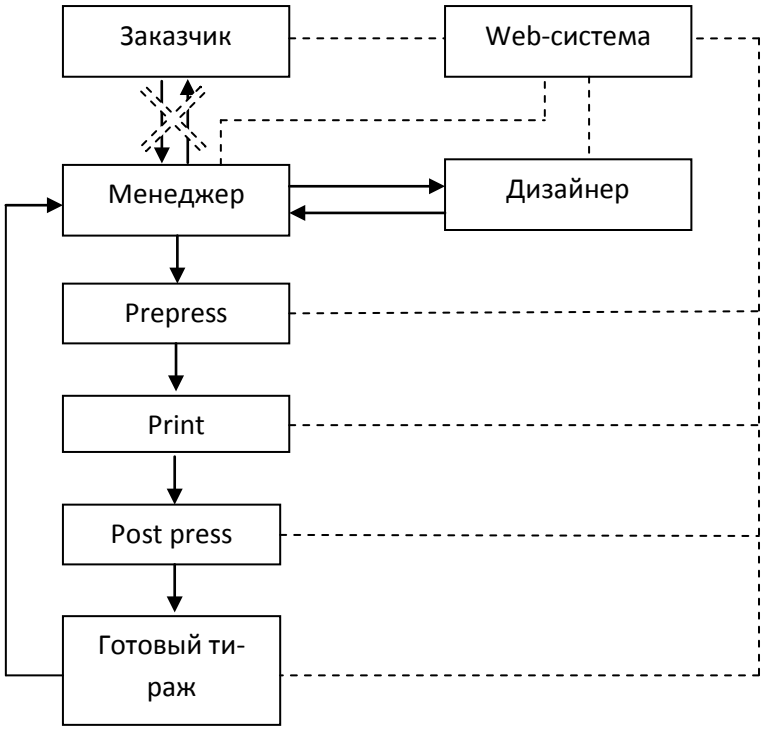


Схема 1. Логистика прохождения заказа в типографии

В комплексе с использованием данной технологии главным отличием является то, что все связи являются двусторонними (обозначены пунктиром) и более оперативными за счет компьютеризации как запросов, так и ответов. В то время как большинство связей между объектами в типичной схеме односторонние и не имеют технического контроля, который бы позволил улучшить и ускорить их качество.

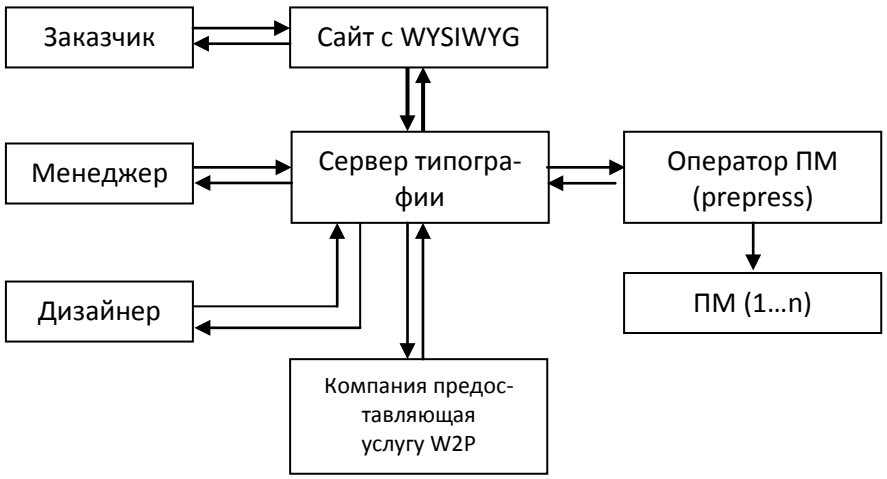


Схема 2. Пример структуры Web-системы

Рассмотрим подробнее Web-систему. На схеме 2 показано, как происходит диалог между объектами и субъектами управления. Заказчик создает новый (или отправляет готовый) оригинал-макет через сайт на сервер типографии, где он становится доступен менеджерам и дизайнерам, которые могут вносить коррективы по требованию заказчика и работать с ним в режиме online. Далее заказ отправляется на печать через оператора ПМ. Далее по схеме 1 на остальные стадии производства (postpress). В этой структуре компания, которая предоставляет услугу Web to Print, контролирует исправность и правильность прохождения сигналов между объектами.

Поскольку большинство заказов являются однотипными, то можно свести их к неким шаблонам, созданным ранее и имеющие заранее верные параметры для печати, что намного облегчает процесс создания оттисков. Соответственно, если заранее создать библиотеки шаблонов под различную типовую продукцию, то можно значительно сэкономить время на изготовление оригинал-макета. Технология W2P позволяет установить диалог между заказчиком и данными библиотеками, предоставляя понятный интерфейс и простое управление инструментами для коррекции персональной информации. То есть, помощь дизайнера уже не требуется, заказчик сам является создателем макета, благодаря шаблонам и инструментам для редактирования этот макет является заранее пригодным для печати. Это один из плюсов данной технологии, но далеко не единственный.

Для того чтобы раскрыть суть данной технологии, требуется сказать о его структуре и возможностях.

Web2Print позволяет:

1) Предоставить четкое и понятное управление при создании и редактировании макета в системе WYSIWYG, что позволяет заказчику самому осуществить допечатную подготовку.
2) Использовать готовый к печати оригинал макет в формате Portable Document Format (PDF), который приемлем как для цифровых, так и для офсетных ПМ.
3) Электронное оформление заказов, составление технологических карт и документов.
4) Упростить контроль над выполнением заказа над любой стадией производства.
5) Производить оплату с помощью Интернета (с использованием электронных кошельков, банковских карт и т.д.)

Какие преимущества появляются с использованием данной технологии:

1) При приеме заказов через Интернет типографии не нужны менеджеры по работе с клиентами, что позволяет снизить себестоимость продукции, на процент, который менеджер получил бы от продажи этого зака-

за. Так же не требуется помещение для менеджеров и, соответственно, средства на их обеспечение.

2) Пропадает необходимость осуществлять Prepress для типовых заказов, он осуществляется автоматически. Это означает, что оператору, который раньше выполнял данные операции, не придется тратить время на все эти операции.
3) Пропадает необходимость в большом помещении для хранения расходных материалов. Достаточным будет наличие типовых материалов, которым отдается предпочтение. Практика некоторых зарубежных типографий говорит о том, что при переходе на технологию web to print удается экономить до 12–15% бумаги.
4) Наличие минимального количества заранее известных и проверенных расходных материалов и бумаг позволяет лучше отладить технологию производства и полностью избавиться от проблем «плохой бумаги», «невысохшей краски», брака на фальцовке и т. д.
5) Пропускная способность типографии сильно повышается. Реально можно добиться 25–30% увеличения производительности за счет того, что все переналадки максимально упрощаются (ради чего в первую очередь все и унифицируется). Формат бумаги используется один и тот же (нет необходимости перестраивать формат), толщина меняется редко (особенно если есть система управления заказами, которая их оптимизирует), переналадки машины, требующие смены краски вообще исключены. То же и с послепечатными процессами: форматы изделий типовые, программы для резки можно сделать заранее, спуски для фальцовки типовые и т. д. При хорошей программной оптимизации заказов можно даже изготавливать последовательно несколько изделий без перестроения послепечатного оборудования (например, можно легко сшить последовательно несколько однотипных буклетов).
6) Существенно снижаются ошибки в выполнении заказов. При наличии всего нескольких типовых видов продукции сотрудники привыкают к одним и тем же операциям и меньше в них ошибаются.
7) При автоматической оплате заказов отпадает необходимость в развитой финансовой службе типографии. Заниматься выпиской счетов, оформлением документов, контролем оплаты не нужно, а значит, в финансовом отделе типографии может работать существенно меньше людей.

Технология W2P является надежным решением и легко интегрируется в системы автоматизации производственных процессов. Основные конечные пользователи решений Web-To-Print - производственный, образовательный, финансовый сектор и сектор здравоохранения.

Преимущества использования технологии W2P очевидны. Это повышение эффективности производства, уменьшение производственных издержек, минимизация времени обработки заказов. В результате — значи-

тельное улучшение конкурентного положения компании, внедрившей W2P, на рынке.

Технология Web to print все чаще используется для внедрения существенных изменений в маркетинговую стратегию организаций. Это проявляется в уходе от ранее использовавшихся решений в пользу систем онлайн управления печатью. Меняются модели управления документооборотом и структурой издержек, на первый план выходят индивидуализация и ориентирование на потребителя. Технология W2P обеспечивает целый набор возможностей — от управления документооборотом до полного набора инструментов персонализированного использования.

После использования этих средств значительно оптимизируется порядок общения компаний с заказчиками.

По оценкам специалистов, W2P является ключевым решением в работе поставщиков печатных услуг. Данная технология обеспечивает доступ клиентов к широкому набору возможностей — от отправки задания на печать до организации персонализированных маркетинговых компаний по выводу товаров на рынок. Web to print позволяет минимизировать издержки, потребность в штатных должностях и потенциальные ошибки.

Примерная схема распределения затрат для двух различных типографий изображена на Схеме 3: первая (слева) работает по технологии web to print; вторая (справа) - по традиционному методу с использованием группы менеджеров по работе с клиентами. Благодаря стандартизации заказов и отсутствию менеджеров по работе с клиентами, все виды затрат в первой типографии оказываются существенно ниже, что дает возможность либо иметь большую норму прибыли, либо более низкую цену на аналогичные заказы.

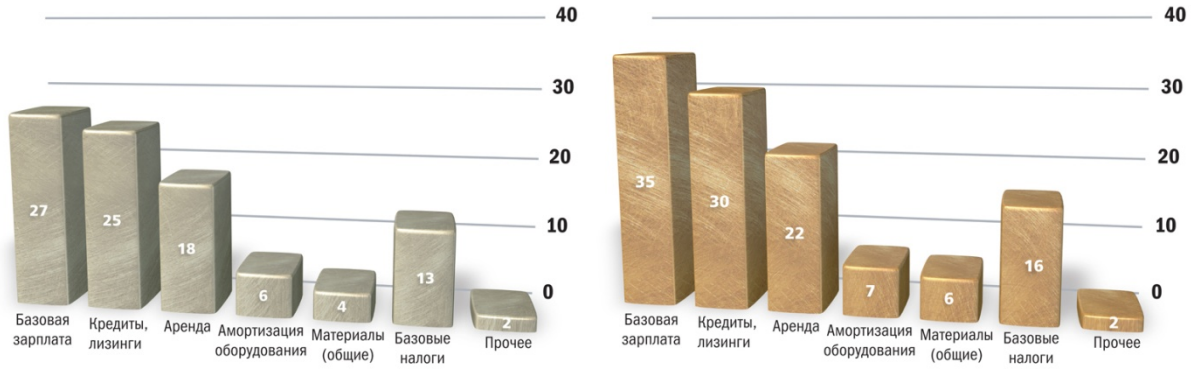


Схема 3. Пример распределения затрат для типографии с использованием web to print (слева) и без ее использования (справа)

На сегодняшний момент не существует системы, которая бы учитывала специфику печати в ВУЗах. Данная специфика заключается в том, что типографии предоставляют не только промышленную печать, но и оперативную, например, печать чертежей. Это подразумевает создание сети малых печатных машин с индивидуальным доступом для каждого студента.

Данное решение позволит ускорить процесс, как самой печати, так и оплаты. Для примера, может быть создана система доступа к печати и оплате на основе пластиковых карт, которая позволит иметь связь с различными интернет ресурсами, в частности, с ресурсами облачного хранения, для доступа к своим файлам.

Предлагаемая технология позволит ВУЗу, как образовательной системе, решить ряд задач. Доступность и простота использования интерактивного и логически понятого интерфейса привлечет людей далеких от медиатехнологий. Возможность создания общей базы данных документов для учета и контроля выпускаемой продукции. Привлечение преподавателей к публикации научных трудов в стенах ВУЗа.

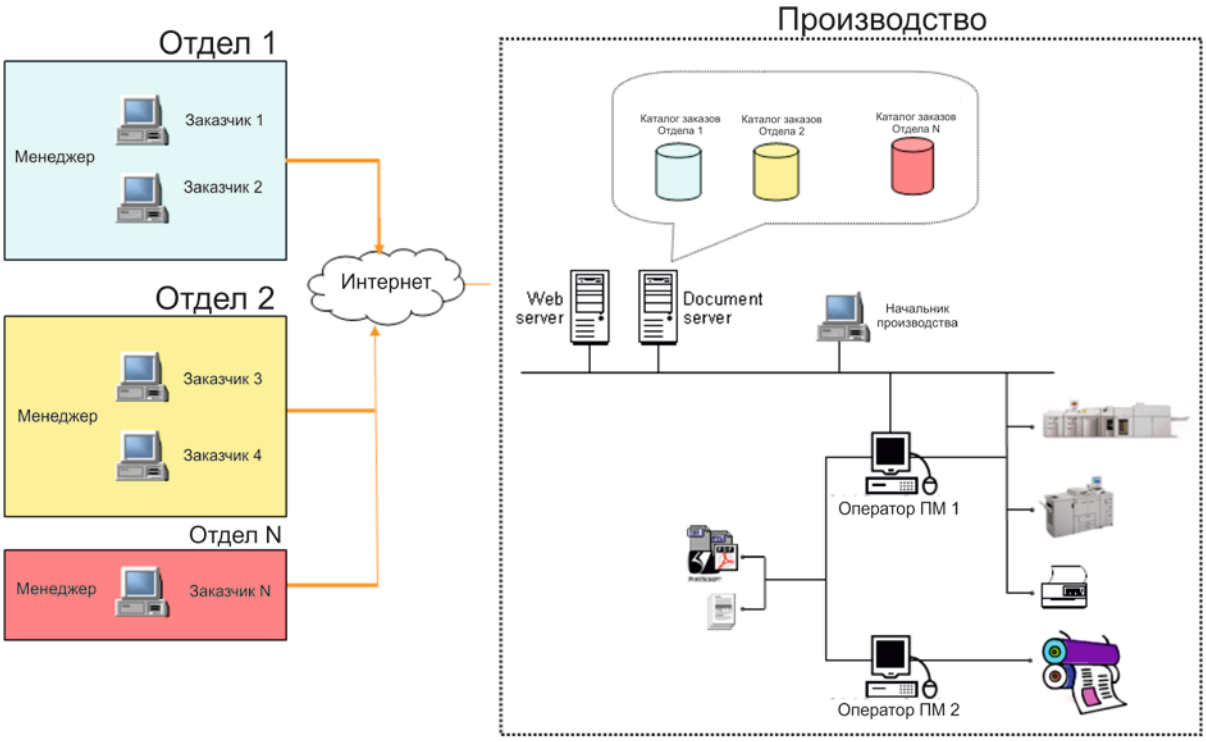


Рис. 1. Структура производства с технологией W2P

В общем случае структуру производства можно представить следующим образом (рис.1). Отделы, расположенные в различных офисах, занимаются сбором заказов и, при необходимости, передачей их дизайнеру. Далее информация о заказчиках и их файлах, сроках выполнения и т.д. размещается на различных серверах: исходя из того, какого рода информация, она может располагаться на Web-сервере или на Файловом сервере. Операторы ПМ получают задания для печати автоматически. Начальник производства следит за выполнением и прохождением заказа на производстве. Так же существует удаленная фирма (не указана на рисунке 1), которая контролирует работоспособность всей системы.

В данной статье мы рассмотрели возможную организацию системы производства W2P для вузовской типографии, которая так же может быть применена и в промышленной печати. Данная технология и ПО используется различными производителями. Здесь были показаны некоторые общие принципы организации процессов в типографии с использованием данной технологии, что может быть полезно при организации новых современных цифровых типографий, интернет магазинов печати и т.д.

Данная технология позволяет:

- Формировать задания через веб интерфейс
- Оплачивать продукцию с помощью кредитных карт
- Повысить эффективность документооборота
- Достичь выравнивания нагрузки на производстве

В отличие от традиционной организации без использования данной системы, W2P позволяет:

- Сократить время обработки заказа
- Минимизировать количество запечатываемого материала на складе
- Повысить контроль на всех стадиях производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Е.Л., Ваганов В.В. Физика в полиграфии. 2-е издание: учеб. пособие. - СПб.:Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 218 с.
2. Солонец В.И., Самарин Ю.Н. Технологические процессы производства: учеб. пособие – М.: МГУП, 2009. - 296 с.
3. Гельмут Киппхан Энциклопедия по печатным средствам информации. - Изд-во Springer - М.: МГУП - HEIDELBERG, 2003. - 1280 с.
4. Кнабе Г.А. Оперативная полиграфия: организация бизнеса и эффективное управление цифровой мини-типографией. – М.: Изд-во Диалектика, 2006. - 240 с.
5. Хайди Толивер Нигро. Технологии печати (пер. с англ. Н.Романова) – М.: ПРИНТ-МЕДИА центр, 2006. -232 с.
6. Фрэнк Романо Современные технологии издательско-полиграфической отрасли. - Изд-во ПРИНТ-МЕДИА бизнес, 2006. -457 с.
7. Кулак М.И., Ничипорович С.А., Трусевич Н.Э. Технология полиграфического производства. - Минск: Белорусская наука, 2011.- 373 с.
8. Стефанов Стефан. Полиграфия и технологии печати: учеб. пособие. – М.: Книжный дом “ЛИБРИКОМ”, 2009. – 144 с.
9. Полянский Н.Н. Технология полиграфического производства. – М.: Издат.: Книга, 1991. – 348 с.
10. Иванов А.В. Учебные и научные вузовские издания: учеб.-метод. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн ун-та, 2009. – 120 с.

УДК 620.179.14

Г.А. Воробьева, Е.Е. Складнова

ВЛИЯНИЕ АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС ГРАФИТИЗАЦИИ В КОВКИХ И СЕРЫХ ЧУГУНАХ И ИХ СВОЙСТВА



Галина Анатольевна Воробьева, к.т.н., профессор
Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова
E-mail Vorobijova_Galina@mail.ru



Елена Евгеньевна Складнова, к.т.н., профессор
Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет « Военмех» им. Д.Ф. Устинова
E-mail Skladnovae@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы, связанные с изменением микроструктуры, механических и технологических свойств ковкого и серого чугуна при аэротермоакустической обработке (АТАО). Показано, что использование АТАО ускоряет процессы диффузии и графитизации в чугуне, что дает возможность сократить продолжительность отжига ковкого чугуна с целью снижения твердости. АТАО обеспечивает возможность получения требуемых механических и технологических свойств ковких чугунов, измельчение графита в серых чугунах и изменения его формы с пластинчатой на вермикулярную.

Ключевые слова: аэротермоакустическая обработка, серый и ковкий чугун, графитизация, механические свойства, диффузия, механическая обработка резанием, технологические свойства, отжиг, микроструктура

G.A. Vorobijova, E.E. Skladnova

THE INFLUENCE OF AERO-TERMO-ACOUSTIC TREATMENT ON PROCESS GRAPHITIZATION IN DUCTILE AND GRAY IRON AND THEIR PROPERTIES

Dr. prof. Galina A. Vorobijova[1], e-mail Vorobijova_Galina@mail.ru;
Dr. prof. Elena E. Skladnova[1], e-mail Skladnovae@mail.ru.
[1]Baltic state technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, Russia

Abstract

The authors consider the problem connected with the change of microstructure and mechanical and technological properties of malleable cast iron providing ATAT is used. It is shown that the usage of ATAT accelerates the processes of diffusion and graying in cast iron that enables to short the duration of malleable cut iron annealing to decrease hardness. ATAT provides possibility to obtain required mechanical and technological properties of malleable cast iron.

Key words: air-thermo-acoustic treatment, malleable and gray cast iron, mechanical properties, diffusion, mechanical treatment by cutting, technological properties, annealing, microstructure.

Одной из главных задач машиностроения является повышение качества и эксплуатационных свойств изделий при уменьшении затрат на их производство, в том числе задача улучшения качества изделий из чугуна. Чугуны (серые, ковкие, высокопрочные) обладают такими функциональными свойствами как высокая демпфирующая способность (способность гасить упругие механические колебания), низкий коэффициент трения, хорошая теплопроводность, литейные свойства, обеспечивающие возможность получения качественных отливок; невысокой себестоимостью производства. Поэтому чугуны - широко распространенные машиностроительные материалы.

Ферритные ковкие чугуны (структура феррит + хлопьевидный графит) благодаря высокой пластичности и низкой твердости хорошо обрабатываются резанием, используются для изготовления деталей, эксплуатируемых при достаточно высоких статических и в ряде случаев динамических нагрузках. При ускоренном охлаждении образуется перлитный ковкий чугун, имеющий повышенную прочность, но умеренную пластичность. Нарушения состава шихты приводят к тому, что при отжиге возможно появление отливок, содержащих отбеленные участки или повышенное содержание перлита в структуре. [1].Это вызывает повышение твердости отливки, невозможность нарезания резьбы или нарушение её размеров, что недопустимо.

Технология производства ковкого чугуна включает двухступенчатый отжиг белого чугуна, в котором весь углерод связан в виде цементита (Fe_3C). Первый этап отжига- выдержка при температуре нагрева ~1000°С в течении~10часов. При этом протекает процесс графитизации первичного цементита. Второй этап отжига осуществляется при температуре выше 740°С в течении более 10ч. с целью графитизации вторичного цементита.

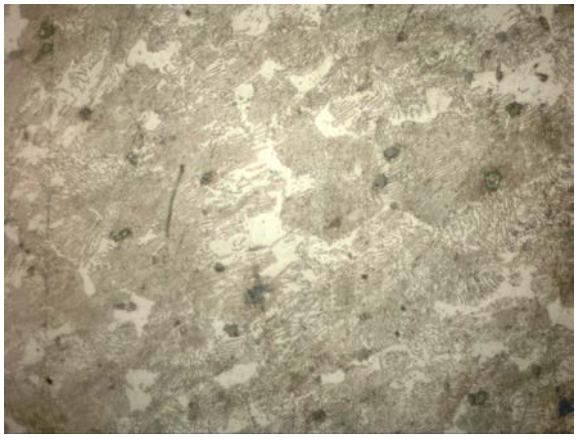
Структура исследованного ковкого чугуна, в исходном состоянии после стандартной термической обработки (СТО) по сечению стенки определяется химическим составом и термической обработкой и состоит из ~ 90% перлита с пластинчатой формой цементита (П) +10% феррита (Ф) в виде сетки +хлопьевидный графит (Гр.) (рис. 1, а, б, в), твердость 1650-2000НВ.



а)



б)



в)

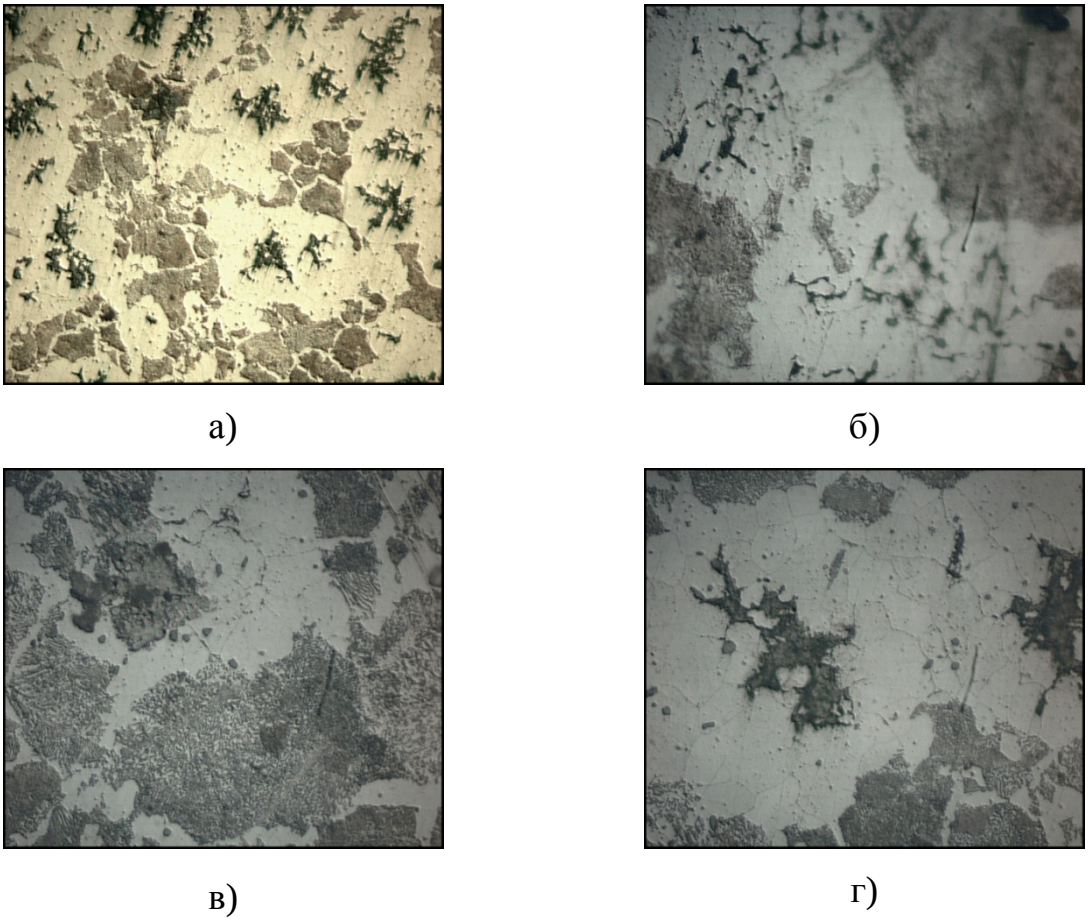
Рис. 1. Микроструктура ковкого чугуна после СТО: а (х125), в (х500) – поверхность, б (х125) – центр

При наличии структуры пластинчатого перлита на внешней поверхности и таком уровне твердости механическая обработка (нарезка резьбы) затруднена. С целью улучшения обрабатываемости резанием и снижения твердости используется дополнительный длительный отжиг для протекания процесса графитизации и сфероидизации цементита.

Разработанные и запатентованные авторами технологии аэротермоакустической обработки (АТАО) металлов и сплавов, в том числе [2], позволили существенно повысить механические, технологические и эксплуатационные характеристики материалов [3,4] за счет изменения структуры последних. Материал при проведении аэротермоакустической обработки можно рассматривать как динамическую систему, на вход которой подается сигнал (управляющий параметр) в виде многоциклического комплексного воздействия акустического поля с частотой 0,4-2,0 кГц (уровень звукового давления 160-185 дБ), нестационарного низкоскоростного потока газа с одновременным воздействием напряжений, возникающих в процессе охлаждения до $T \leq (250\text{-}320°K)$ материала, нагретого перед началом обработки, а при наличии фазовых превращений – напряжений, возникающих при переходе через точку превращения - фазовый наклеп.

В работе исследовалась возможность применения АТАО для сокращения длительности обработки и улучшения технологических свойств. АТАО была осуществлена по режиму : нагрев до температуры A_{c1} + 20°С + АТАО, выдержка 20мин., охлаждение в установке в течение ~5 -10мин., структура ковкого чугуна изменяется, соотношение структурных составляющих соответствует: в поверхностном слое (ускоренное охлаждение)пластинчатый перлит до ~50% П + 50% Ф +Гр.(рис.2а,б), в центре преимущественно Ф+ Гр.+ зернистый перлит.(рис.2.в,г). Твердость чугуна при этом снижается до 1210 НВ, что обеспечивает получение достаточной пластичности и качественной резьбы.

Рассмотрим процессы, протекающие в ковком чугуне при проведении АТАО. При нагреве до температуры ~740-750°С и последующей выдержке структура чугуна: А +Ф + Гр., при этом даже при непродолжительной выдержке начинается выделение графита из аустенита (процесс идет с уменьшением свободной энергии и , следовательно, выгоден с термодинамической точки зрения)[5], продолжается выделение Гр.и в процессе охлаждения с применением АТАО. Во время охлаждения протекает полиморфное превращение ($Fe\gamma \rightarrow Fe\ \alpha$), при этом углерод выделяется в виде графита из аустенита и феррита, а образующийся перлит имеет зернистую форму цементита. Такая структура чугуна имеет повышенную пластичность и хорошую обрабатываемость резанием.



а) б)

в) г)

Рис. 2. Микроструктура ковкого чугуна после АТАО-2.а,(х125), б(х500) - поверхность (перлит зернистый) +феррит + графит,в(х500) – центр (перлит зернистый) +феррит, г (х 500) – центр (феррит + перлит зернистый + графит)

Таким образом, при проведении АТАО диффузия углерода ускоряется более чем в 3,7 раза, что способствует протеканию графитизации в достаточной степени и образованию перлита с зернистой формой цементита, что существенно улучшает обрабатываемость резанием.

Металлографическое исследование показало присутствие в центре включений свободного хлопьевидного графита « светлых пятен» (рис.2 в,г). Микротвердость «светлых пятен» значительно выше твердости графита. В работе [6] в центре шаровидного графита высокопрочного чугуна экспериментально было выявлено наличие насыщенного модификаторами «светлого пятна» с высокой твердостью. Высказано предположение, что формирование шаровидного графита имеет фуллереновую природу. Следовательно, с большой долей вероятности можно предположить , что «светлые пятна « на снимках представляют собой эндоэдральные фуллереновые комплексы, образующие фрактальные агрегаты (с размером до 7мкм.) [7].

Структура серого чугуна состоит из металлической основы и графита в форме пластин. Свойства чугуна зависят от этих двух структурных составляющих. Количественное соотношение основы и графита, его форма и размеры влияют на механические свойства чугуна. С увеличением количества и размеров пластинчатого графита свойства чугуна резко ухудшаются, так как графит обладает низкими механическими свойствами, поэтому приближенно его можно считать надрезом на металлической основе. При растягивающих напряжениях на концах пластинчатых включений графит образуются центры разрушения–микротрещины. Коэффициент концентрации напряжений (К) около включений графита пластинчатой формы составляет 4,0-7,5 (К=4 для серого чугуна на перлитной основе, пластичность его равна δ= 0,2-0,75%), а около включений графита шаровидной формы 2,5-3,5. Более высокие свойства чугуна при напряжениях сжатия и изгибе так как предел прочности на сжатие определяется преимущественно металлической основой. Уровень физико-механических свойств серых чугунов часто оказывается недостаточным (серые чугуны имеют практически пластичность ~ 0%.). Более высокими механическими свойствами обладают чугуны с вермикулярным, хлопьевидным и шаровидным графитом, первый из которых присутствует в чугунах с аналогичным названием, второй и третий в ковких и высокопрочных чугунах соответственно. Для вермикулярного графита характерна извилистая форма и прерывистое строение, равномерное расположение и небольшая разница между длиной и шириной включений. Вермикулярный графит получают путем обработки исходного расплава модификаторами (используется лигатура состава Fe-Si-Mg-Ti- Ce-Ca, содержащая 5-7% магния). Чугуны с такой формой графита имеют повышенную теплопроводность по сравнению с шаровидным графитом, имеют меньшую склонность к дефектам усадочного происхождения.

С целью повышения механических свойств серых чугунов использовались различные схемы: низкой, средней и высокотемпературной термоциклической обработки (ТЦО). Низкотемпературная ТЦО с нагревом до 650°С с последующим охлаждением в воде (количество циклов до 40) приводит к дроблению зерен феррита и цементитных пластин, что обеспечивает повышение твердости и прочности чугуна, но не влияет на пластичность.[8].

Среднетемпературная ТЦО используется для графитизации белого чугуна и для повышения свойств высокопрочного чугуна.

Высокотемпературную ТЦО (ВТЦО) применяли для сфероидизации графита в сером чугуне по режиму: циклический нагрев до 900, 930°С, выдержка при температуре нагрева 10мин., охлаждение на воздухе до 600°С, число циклов не более 20. В результате ВТЦО происходит формоизменение графита. С увеличением числа циклов твердость чугуна снижается. Макси-

мум модуля изгиба наблюдается при 3-4 циклах.[1].Как видно из приведенных результатов ТЦО должна проводиться с большим числом циклов и при этом не всегда достигается значительный результат по повышению механических свойств.

Для сфероидизации графита в сером чугуне изучалась возможность использования АТАО. Ранее выполненные работы показали возможность ускорения диффузионных процессов при применении АТАО[9,10]. Исследование проводилось на чугуне марки СЧ20, (ГОСТ 1412-85). Механические свойства чугуна: σ_B, 200МПа, при Δ менее 10мм -220 МПа, НВ, не более 240 МПа.

Структура чугуна: металлическая основа феррит + перлит, графит пластинчатой формы, крупные пластины графита расположены неравномерно на фоне феррита. АТАО образцов осуществлялась по схеме : нагрев до 900-920°С, выдержка в печи 10мин, часть образцов охлаждалась на воздухе, остальные в установке для АТАО, время обработки в установке 10 мин., число циклов -2.

Режимы обработки, механические свойства после АТАО и в исходном состоянии приведены в табл. 1.

Таблица 1

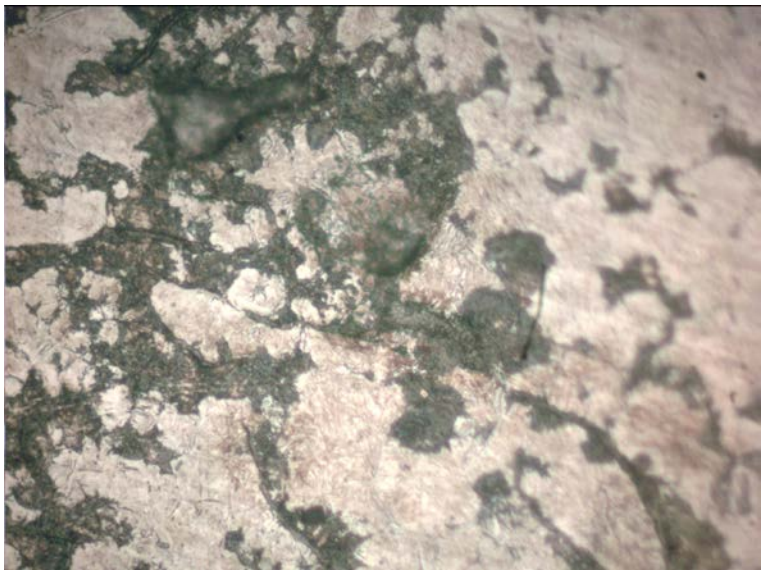
Режимы обработки и свойства чугуна СЧ20 после АТАО

№	Режим обработки				Механические свойства			Структура чугуна
Режима АТАО	Т-ра, нагрева. °С	Среда охлаждения	Время охл. мин	№ циклов	НВ	$\sigma_в$, МПа	δ, %	
1	900	Воздух	-	-	200	230	0,5	Феррит +Перлит, графит пластинчатой формы
2	900	АТАО	10	2	210	240	3	Феррит, перлит, графит измельченный, ластинчатой формы, частично сфероидизированный
3	900	АТАО	10	3	285	230	1	Бейнит+графит измельченный пластинчатой формы

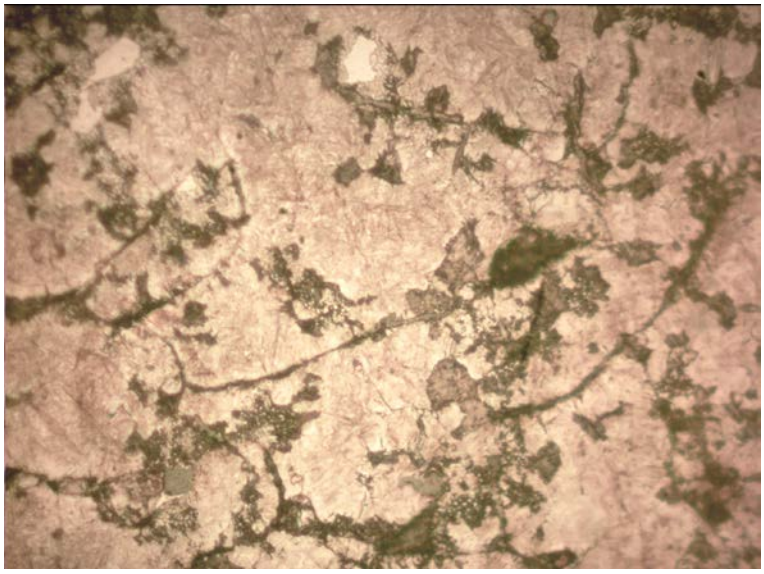
*время выдержки 10-15мин,

Как видно из данных приведенных в табл.1 . АТАО обеспечивает при двух циклах обработки повышение пластичности чугуна до уровня характерного для чугуна с вермикулярным графитом при сохранении прочности, что позволяет использовать его для изделий, работающих при более жестких ре-

жимах нагружения. Повышение пластичности определяется частичной сфероидизацией графита, появлением хлопьевидного графита, особенно на концах графитных включений, сохраняющих пластинчатую форму. В этом случае графит значительно в меньшей степени играет роль концентратора напряжений (рис. 3, а).



а)



б)

Рис. 3. а) Микроструктура серого чугуна, АТАО -2, центр образца;
б) поверхность х600

В результате обработки наблюдается и измельчение пластинок цементита в перлите, частичная их сфероидизация. Графит, расположенный на фоне феррита не образует замкнутой сетки. При обработке по режиму АТАО- 3 также наблюдается измельчение пластинок графита. Повышенная твердость связана с образованием структуры типа бейнита (рис. 3, б).

Процесс изменения формы графита в сером чугуне протекает ускоренно при проведении АТАО, что может быть связано с действием тех же факторов, которые ускоряют протекание процесса графитизации в ковком чугуне т.е. определяться протеканием процесса микропластической деформации.

Выводы:

1. АТАО ковких чугунов с «отбелом» позволяет формировать требуемую структуру, устраняя «отбел», способствует ускорению процесса графитизации.

2. Ускорение диффузионных процессов при проведении АТАО ковких чугунов по сравнению со скоростью этих процессов в условиях стандартной термической обработки обусловлено протеканием микропластической деформации в процессе обработки.

3. АТАО серых чугунов позволяет формировать структуру, изменяя форму графита (происходит частичная его сфероидизация); при этом наблюдается рост пластичности до значений, соответствующих пластичности чугуна с вермикулярным графитом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сандомирский С.Г. Оптимизация магнитного контроля структуры отливок ковкого чугуна // Заводская лаборатория. 2009. №8. С.39-43.
2. Новиков И.И.Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 486с.
3. Воробьёва Г,А., Ерофеев В.К. Концептуальная модель влияния аэротермоакустической обработки на свойства металлических материалов// Металлообработка. 2009. №3. С.32-37
4. Пат. № 2100456 Российская Федерация C21D9/22,C21D6/04. Способ упрочнения изделий из углеродистых, легированных, ысоколегированных, быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов» В.К.Ерофеев, В.В. Григорьев, Г.А. Воробьева; заявитель и патентообладательБалтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.опубл.. 27.12.1997. Бюл. №36.
5. Пат. № 2153010 Российская Федерация C21D1/613, C21D5/00 Способ термической обработки литой заготовки из ковкого чугуна при наличии в его структуре «отбела»/ В.К.Ерофеев, Г.А. Воробьева; В.В. Григорьев;

заявитель и патентообладатель Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.; опубл. 20.07.2000. Бюл. №20.
6. Жуков А.А. О формах существования углерода в чугунах // МиТОМ. 1992. №11. С.34-38.
7. Давыдов С.В. Новые технологии модифицирования чугунов // Металлургия машиностроения. 201.№1. С. 8-13.
8. Смагоринский М.Е., Федюкин В.К., Термоциклическая обработка металлов и деталей машин Л.: Машиностроение. 1989. С.255.
9. Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Леонов А.Ф., Ерофеев В.К. Инструментальные материалы. СПб.: Политехника. 2005. С.258.
10. Воробьева Г.А., Усков В.Н. Аэротермоакустическая обработка сталей и сплавов // СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ». 2012. С.130.

УДК 519.24

М. Н. Гусев

РАСШИРЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЗВУКОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ



Михаил Николаевич Гусев, к.т.н., докторант
Санкт-Петербургский Государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(964)322-43-09,
E-mail: michael.n.gusev@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрено моделирование длительности звуков речи и применение предложенной модели в системе распознавания. Рассматриваются различные дополнительные факторы, влияющие на длительность звуков, и определяются существенные для моделирования. Выполняется дополнение модели длительности новыми зависимостями. Результаты экспериментов показывают эффективность учета дополнительных зависимостей в модели.

Ключевые слова: распознавание речи, моделирование длительности звуков речи

M.N. Gusev

THE EXTENDED MODEL SOUND DURATION FOR SPEECH RECOGNITION SYSTEM

Mikhail N. Gusev, St. Petersburg State University of Telecommunications
Russia, e-mail: Michael.Gusev @ vocative.ru

Abstract

In the paper, we consider modeling the duration of speech sounds and the application of the proposed model in recognition system. Discusses various additional factors affecting the duration of the sound, and identify relevant for modeling. Duration model adds new dependencies. The experimental results show the effectiveness of accounting additional dependencies in the model.

Keywords: speech recognition, modeling the duration of speech sounds

Введение

Скрытые Марковские модели (СММ) – являются мощным инструментом, позволяющим распознавать речевой сигнал с высоким качеством. К недостаткам СММ среди прочих причисляют и отсутствие средств моделирования длительности звуков. Не секрет, что параметры произносимых звуков обладают значительной вариативностью. Как одно и то же слово, произнесенное одним и тем же диктором, может состоять из разных наборов звуков, так и «одинаковые» звуки могут различаться между собой. Длительность звуков только один из изменяющихся параметров. Значительная вариативность длительности звуков речи делает задачу моделирования и учета в процессе распознавания речи данного параметра актуальной.

Зависимость вероятности появления фонем от их длительности

В результате анализа 40 часов сегментированных записей речи были построены гистограммы вероятностей появления фонем различной длительности [1]. Звуки короче 36 мс и длиннее 720 мс считались невалидными, и при построении гистограмм не учитывались. Диапазон допустимых длительностей был разбит на 57 отрезков по 12 мс каждый.

Выяснилось, что зависимости для разных фонем существенно различаются. Были выявлены три основных формы зависимостей вероятностей появления фонем от их длительности, получившие условные названия «коса» (рис. 1), «нормальное» (рис. 2) и «шляпа» (рис. 3).

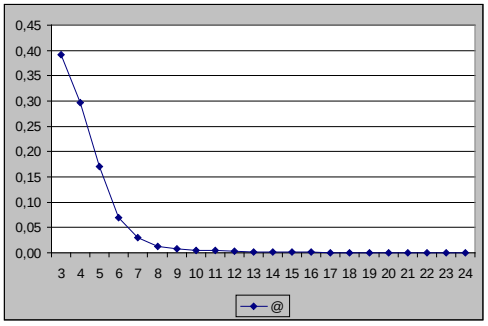


Рис. 1. Зависимость «коса»

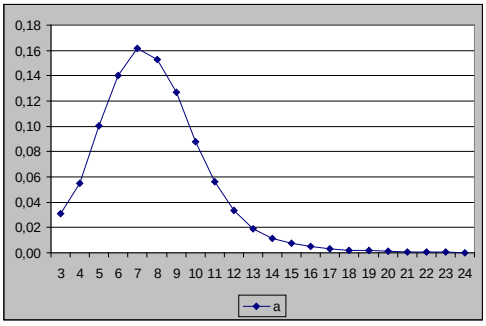


Рис. 2. Зависимость «нормальное»

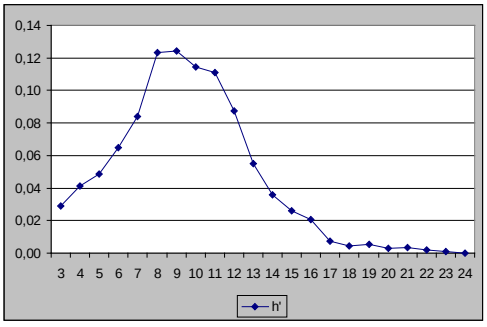


Рис. 3. Зависимость «шляпа»

Наиболее часто встречается распределение вида «нормальное» - им описывается около 2/3 всех зависимостей, еще около 1/3 фонем описываются зависимостью типа «коса», и только для трех фонем характерна зависимость типа «шляпа».

Эксперименты показали [1], что зависимость вероятности появления фона от его длительности с высокой точностью моделируется модифицированной формулой закона нормального распределения (1). Видно, что (1) получена из закона нормального распределения путем введения трех параметров:

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi(D-a_2)}}e^{-\frac{(x-m+a_1)^2}{2(D-a_3)}}. \qquad (1)$$

Изменение параметра a_1 приводит к сдвигу кривой (при увеличении – влево, при уменьшении – вправо); параметр a_2 регулирует вертикальное растяжение/сжатие (увеличение параметра растягивает кривую, уменьшение - сжимает); параметр a_3 управляет горизонтальным растяжением/сжатием (увеличение a_3 сжимает кривую, уменьшение - растягивает).

Для подбора параметров законов распределений фонем была разработана программа, реализующая метод градиентного спуска с переменным шагом. В качестве минимизируемой целевой функции используется квадратичная ошибка:

$$E_i(a_1,a_2,a_3)=\sum_{j=3}^{24}\left(fe_j - f_j(a_1,a_2,a_3)\right)^2, \text{ где} \qquad (2)$$

fe_j – экспериментальное значение вероятности появления фонемы в отрезке j;

$f_j(a_1,a_2,a_3)$ – моделируемое по (1) значение вероятности появления фонемы в отрезке j.

Есть две причины выбора целевой функции вида (2): важнее добиться высокой точности описания для больших значений функции распределения, чем для меньших; в некоторых отрезках j значение fe_j может равняться нулю из-за того, что количество реализаций данного фона мало.

В таблице 1 представлены параметры законов распределений, использованных в качестве примера форм зависимостей (рис. 1-3).

Таблица 1. Параметры законов распределения

Фонема	m	D	a1	a2	a3	E
@	4,296139	4,004516	1,873084	3,059915	0,233991	0,000195
a	7,877618	8,097394	0,470001	1,867001	1,985900	0,000318
h'	9,718665	17,485761	0,460000	6,694901	6,969100	0,000741

На рис. 4 – 6 приведены экспериментальные зависимости и их модели, полученные в результате подбора параметров. Из рисунка и таблицы видно, что предложенная общая формула закона распределения (1) позволяет с высокой точностью моделировать зависимость вероятности появления фона от его длительности. Полученный комплект зависимостей и есть модель длительности звуков речи. Дополнительно следует заметить, что при моделировании длительность бралась не в мс, а в интервалах.

В таблице 2 приведены результаты тестирования системы распознавания на пяти грамматиках. В тестировании использовалось более 15 тысяч файлов с записями команд (от 2 до 4 тысяч команд на грамматику).

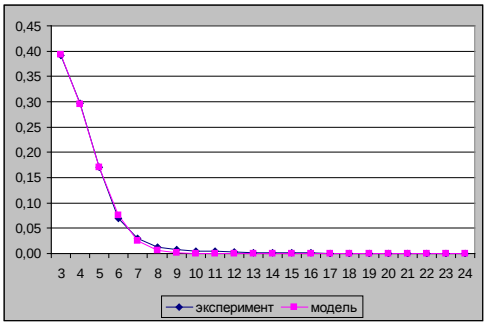


Рис. 4. распределения для фонемы «@»

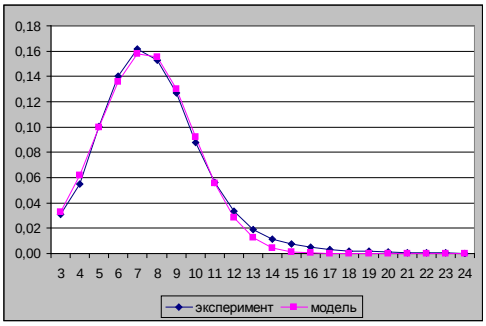


Рис. 5 распределения для фонемы «a»

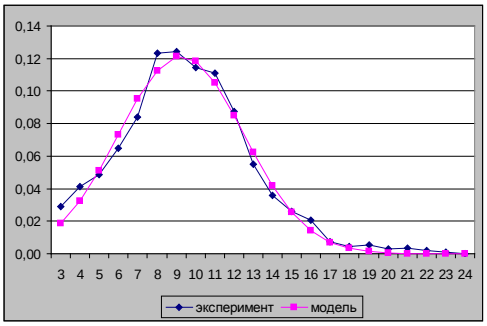


Рис. 6. распределения для фонемы «h'»

Таблица 2. Результаты тестирования процента распознавания с учетом моделей длительности фонем

Грамматика	Количество разных слов	Результаты распознавания, %		Время счета, с	
		без учета	с учетом	без учета	с учетом
Список сотрудников 1	356	89,6	93,4	0,977	0,879
Список сотрудников 2	211	91,2	92,7	0,840	0,733
«Да/нет»	9	96,8	98,2	0,047	0,041
Станции метро	75	93,3	94,1	0,773	0,662
Пинкоды	10	80,5	77,3	0,628	0,549

Видно, что на четырех грамматиках происходит увеличение процента правильно распознанных команд при подключении моделей длительностей фонем, и на всех грамматиках среднее время вычислений сокращается на 10-15%. Падение процента на грамматике «пинкоды» объясняется недостаточной точностью моделирования.

Развитие модели

Длительность звуков речи зависит от множества факторов: коммуникативная ситуация и условия фонации, стиль речи [2-4], наличие акцентов и диалектов [5], социально-экономические факторы, эмоциональное состояние [6-8], анатомические особенности диктора [9]. Кроме того, длительности звуков зависят от контекста, позиции в слове и фразе. Остановимся подробнее на некоторых общих закономерностях, учет которых может оказаться полезным для повышения точности распознавания речи.

В результате исследования зависимости длительности звуков от длины высказывания [10] было установлено, что с увеличением длительности высказывания средняя длительность звуков уменьшается. Также было установлено, что начальные сегменты оказываются короче конечных, причем длительность зависит от количества звуков, оставшихся до конца высказывания.

В [10] также отмечается, что все исследованные факторы, вызывающие изменение длительности как гласных, так и согласных звуков, действуют независимо, и для предсказания длительности звука фразы может использоваться принцип суперпозиции.

Полученные выводы подтверждаются порождающими моделями длительности звуков речи, с успехом используемые в системах синтеза речи по тексту.

Модель, описывающая длительности гласных звуков на основе принципа «несжимаемости», имеет вид (3). Предполагается, что в ударной позиции длительность i-го гласного не может быть меньше величины T_{imin}, а влияние контекста учитывается коэффициентом k.

$$T_i = k\left(T_i^{(0)} - T_{i\min}\right) + T_{i\min}, \qquad (3)$$

где $T_i^{(0)}$ – собственная длительность гласного в ударной позиции.

Предлагается также модификация модели (3) учитывающая сокращение длительности гласных звуков в зависимости от их числа и положения в высказывании (4):

$$T_i = \alpha^a \beta^b \left(T_i^{(0)} - T_{i\min}\right) + T_{i\min}, \qquad (4)$$

где α и β - коэффициенты укорочения, a – количество слогов после данного звука, b – количество слогов перед данным звуком.

Модели (3) и (4) предназначены исключительно для гласных звуков. В качестве общей модели длительности звуков в высказывании, короче 15 звуков, предлагается следующее уравнение:

$$T_j = \left[T_j^{(0)} - k_n(N - j)\right] \cdot \left[1 - (1 - k_T)\frac{N - j + 1}{N}\right] \cdot \frac{T}{N}, \text{ где} \qquad (5)$$

k_n – коэффициент сжатия, требуемого по условиям экономии оперативной памяти;

k_T – коэффициент темпа речи;

N – количество звуков в высказывании;

T – длительность высказывания.

Исходя из приведенных выше результатов, было решено учесть в модели длительности зависимость от положения звука во фразе. Для различных звуков речи были построены экспериментальные законы распределения вероятности появления звука заданной длительности в заданной позиции высказывания. Примеры полученных законов распределения представлены на рис. 7 и 8.

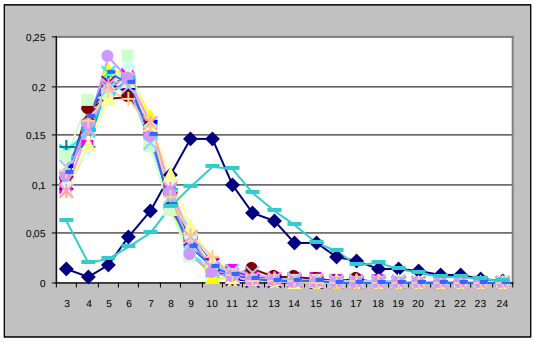


Рис. 7. Для фонемы «a1»

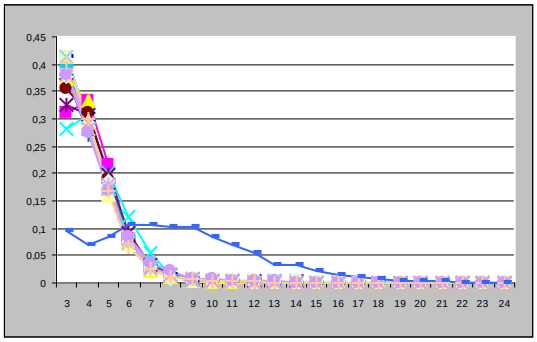


Рис. 8. Для фонемы «@»

Из рисунка видно, что за исключением одной (для «@») или двух (для «a1») кривых, распределения практически совпадают. Выделяющиеся зависимости соответствуют начальным и конечным звукам (на «@» выделяется только одна зависимость, т.к. начальных «@» не существует).

Полученные семейства распределений позволяют сделать вывод о том, что:

- зависимость длительности звука от положения в высказывании не так велико, как принято считать;
- законы распределения длительностей для начальных и конечных фонем высказываний существенно отличаются от законов распределений звуков, расположенных внутри высказываний.

Порождающие модели длительностей звуков речи (3-5) также предполагают, зависимость длительности звуков речи от количества звуков в высказывании. Для проверки этой гипотезы были определены средние значения длительностей звуков в высказываниях, содержащих от 2 до 78 звуков. Полученные зависимости длительности звуков от количества звуков в высказывании представлены рис. 9 – 12.

Из рис. 9 видно, что как для ударных, так и для безударных гласных, характерно падение средней длительности с увеличением количества звуков в высказывании. Основное падение происходит на высказываниях, содержащих до 16 (30) звуков. При дальнейшем увеличении длины высказываний длительность звуков продолжает медленно убывать. Также видно, что длительности безударных гласных меньше длительностей ударных.

Из рис. 10 видно, что для мягких и твердых сонант характерно сокращение длительности с увеличением количества звуков в высказывании. Основное падение происходит на высказываниях, содержащих от 22 до 30 звуков. При дальнейшем увеличении длины высказываний длительность сонант продолжает медленно убывать. Также видно, что твердость и мягкость практически не влияют на длительности сонант.

Из рис. 11 видно, что для твердых и мягких сонант характерно сокращение длительности с увеличением количества звуков в высказывании. Основное падение происходит на высказываниях, содержащих до 22 звуков. На высказываниях в 23 – 35 звуков происходит некоторое повышение длительности взрывных, после чего продолжает медленно убывать.

Для шипящих и аффрикат не наблюдается столь гладкой картины, как для других типов звуков. (Возможно, причина кроется в их меньшей частотности.) Однако графики (рис. 12) позволяют проследить общую тенденцию уменьшения длительности звуков с увеличением их количества в высказывании.

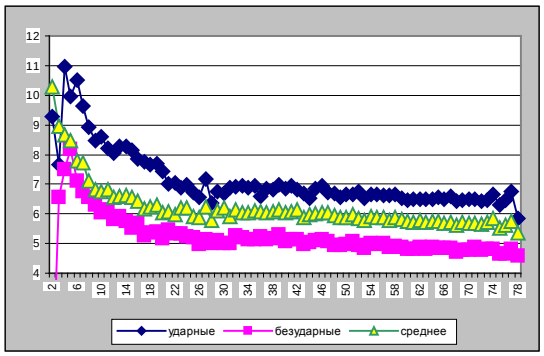


Рис. 9. Ударные
и безударные гласные

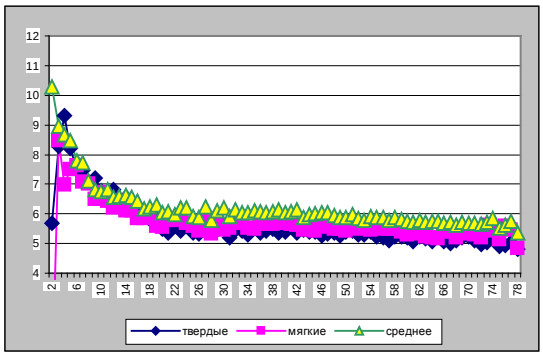


Рис. 10. Твердые
и мягкие сонанты

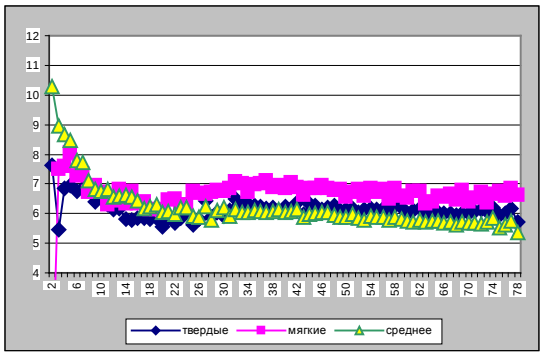


Рис. 11. Твердые и мягкие взрывные

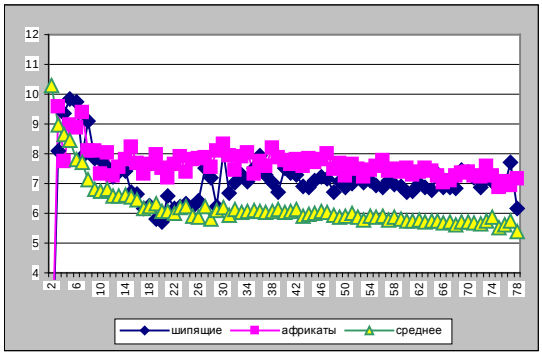


Рис. 12. Шипящие и аффрикаты

Зависимости, представленные на рисунках 9 – 12, подтверждают:

- наличие связи между количеством звуков во фразе и их длительностью;
- существование общей тенденции убывания длительности звуков с увеличением их числа в высказывании;
- уникальность вида зависимости для звуков разных типов.

Сказанное выше свидетельствует о целесообразности учета длительности высказываний (выраженной в количестве звуков речи) в модели длительностей звуков. В качестве примера приведем экспериментальные зависимости вероятностей появления фонемы «a1» заданной длительности в словах с различным количеством звуков (рис. 13).

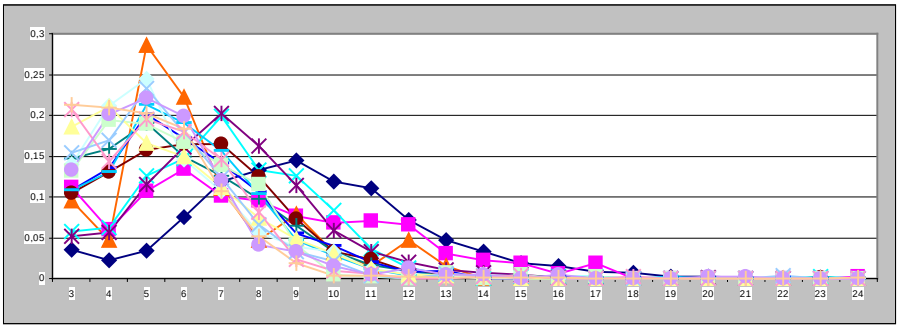


Рис. 13. Экспериментальные зависимости вероятностей появления фонемы «a1»

В (3) с помощью коэффициента k, учитывается влияние контекста на длительность звука. В [10] приводятся правила для коррекции длительности звуков в зависимости от контекста, используемые в системах синтеза речи по тексту. Приведем некоторые из них:

- следующий за ударным звуком согласный звук укорачивается на 25 мс; звук, следующий за укорачиваемым согласным, также укорачивается на 25 мс;
- гласный, предшествующий звонкому согласному, удлиняется на 20 мс;

- предшествующий щелевому согласному гласный удлиняется на 15 мс; и т.д.

С учетом того, что модель описывает зависимость длительности от количества звуков в высказывании, и общего количества всех возможных контекстов, построение распределений для всех возможных контекстов не представляется возможным. В большинстве случаев для построения распределений просто не хватает данных.

В результате исследования встречаемости звуков в различных контекстах было решено выделить четыре контекстных группы (табл.3):

Таблица 3. Контекстные группы и их состав

Название	Состав
sil	Тишина (sil, ClearSil, null)
Vow	Гласные (a, e, o, u, i, y, a1, u1, @, i1, _a, _o, _u, _a1, _u1)
Voi	Звонкие согласные (v, l, m, n, j, v’, l’, m’, n’, r, r’, z, z’, x, b, g, d, b’, g’, d’)
Uvo	Глухие согласные(k, p, t, k’, p’, t’, f, f’, h, h’, w, s, s’, $, c, ch)

На рис. 14 представлены зависимости вероятностей появления фонемы «a1» в трехзвучных словах от их длительности в различных контекстах.

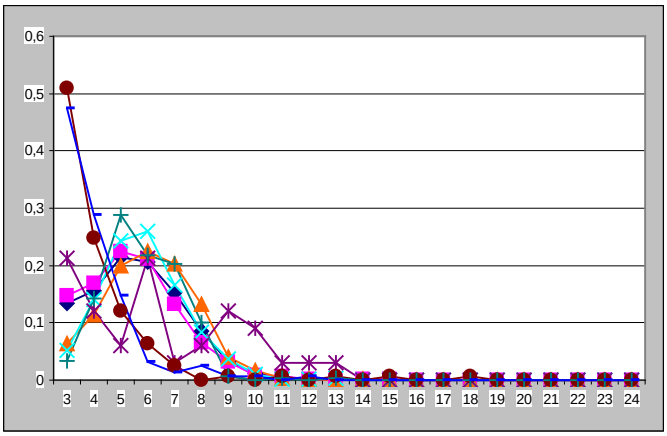


Рис. 14. Зависимости вероятностей
появления фонемы «a1» в трехзвучных словах

Видно, что контекст определяет форму зависимости. Следовательно, включение контекстов в создаваемые модели длительностей звуков, представляется целесообразным.

Результаты экспериментов

В систему распознавания было внесено моделирование всех, признанных полезными зависимостей длительности. На использовавшемся ранее множестве команд было выполнено измерение процента правильного распознавания. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты тестирования процента распознавания с учетом моделей длительности фонем

Грамматика	Результаты распознавания, %			Время счета, с		
	без учета	с учетом	развитие	без учета	с учетом	развитие
Список сотрудников 1	89,6	93,4	95,2	0,977	0,879	1,011
Список сотрудников 2	91,2	92,7	94,5	0,840	0,733	0,976
«Да/нет»	96,8	98,2	98,2	0,047	0,041	0,050
Станции метро	93,3	94,1	97,9	0,773	0,662	0,876
Пинкоды	80,5	77,3	84,3	0,628	0,549	0,605

Проведенные эксперименты показали увеличение точности распознавания на всех грамматиках, и, следовательно, дополнительные учитываемые зависимости были выбраны верно.

Из таблицы 4 видно, что на всех грамматиках время вычисления возросло. Это связано с тем, что возросшая сложность модели длительности не компенсируется в результате оптимизации максимальных длин цепочек звуков (см. [1]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев М.Н., Дегтярев В.М. Моделирование длительности звуков в системе распознавания речи // "Вопросы радиоэлектроники", серия Общетехническая, 2010, вып. 2, стр. 106-115.
2. Речь. Артикуляция и восприятие / Ленинград, Наука, 1965
3. Gay T. Mechanisms in the control of speech rate / Phonetica, 1981, V38, №1, pp. 663-666.
4. Сорокин В.Н. Теория речеобразования / Москва, «Радио и связь», 1985.
5. Михайлов В.Г., Златоустова Л.В. Измерение параметров речи // под редакцией Сапожкова М.А. / Москва, «Радио и связь», 1987.
6. Dolanscy L. On Certain Irregularities of Voiced Speech Waveforms // IEEE J., 1968, AU-16, № 1, pp. 51-56.
7. Методы автоматического распознавания речи / Пер. с англ. под ред. У. Ли., Москва, «Мир», 1983.
8. Фролов М.В., Таубкин В.Л., Лужбин Н.А. Алгоритм распознавания эмоциональных состояний дикторов по реализациям главноударных гласных звуков // Речь, эмоции и личность, Ленинград, «Наука», 1978, стр. 190-194.
9. Фант Г. Акустическая теория речеобразования / Пер. с англ., Москва, «Наука», 1964.
10. Сорокин В.Н. Синтез речи / Москва, "Наука", 1992.

УДК 681.58 +681.518

В. И. Дягилев, В.А. Коковин, С.У. Увайсов

ПОСТРОЕНИЕ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С АДАПТИВНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК



Владимир Иванович Дягилев, к.т.н., доцент
Международный университет природы, общества и человека "Дубна", Филиал "Протвино", кафедра «АТПиП», Россия, Протвино, Московская область, Северный пр.9. Тел.: (4967)31-02-34, E-mail: dvi-39@mail.ru.



Валерий Аркадьевич Коковин, к.т.н., доцент
Международный университет природы, общества и человека "Дубна", Филиал "Протвино", кафедра «АТПиП», Россия, Протвино, Московская область, Северный пр.9
Тел.: (4967)31-0234, E-mail: kokovin@uni-protvino.ru.



Сайгид Увайсович Увайсов, д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроники и телекоммуникаций» Московский институт электроники и математики, Россия, Москва, Б. Трёхсвятительский пер., 3
Тел.: (495)9168813, E-mail: s.uvaysov@hse.ru.

Аннотация

Рассмотрены особенности схемотехнических решений построения и проектирования силовых преобразователей, входящих в состав ультразвуковых технологических установок. Приведены результаты моделирования схемы замещения силового преобразователя. Разработана диаграмма информационных потоков адаптивной системы управления силового преобразователя.

Ключевые слова: ультразвуковые технологии, силовой преобразователь, потоки данных, диаграммы потоков данных.

Diagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaysov S.U.

DESIGN A POWER CONVERTER WITH AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR ULTRASONIC PROCESSING UNITS

Dr. Vladimir I. Diagilev[1], e-mail: dvi-39@mail.ru;
Dr. Valery A. Kokovin[1], e-mail: kokovin@uni-protvino.ru;
Dr. Saygid U. Uvaysov[2], e-mail: s.uvaysov@hse.ru.
[1]Dubna International University of Nature, Society and Man, Branch “Protvino”, Russia;
[2]Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Russia

Abstract

The features of circuit design construction and design of power converters included in the ultrasonic process plants. The results of simulation of the equivalent circuit of the power converter. Developed information flows diagram of adaptive control system of the power converter.

Key words: ultrasound technology, the power converter, data flows, data flow diagrams.

В машиностроении широко применяются технологии ультразвуковой обработки и очистки различных деталей [1]. Также широко используются методы акустического контроля при неразрушающем контроле машиностроительных изделий. В этом случае повышение эффективности работы ультразвуковых технологических установок (УТУ) является актуальной задачей. Существуют различные способы повышения эффективности УТУ: применение современных методов построения силовых преобразователей (автоподстройка частоты генератора, контроль допустимой амплитуды колебаний пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) и т.д.), улучшение характеристик самих пьезоэлектрического преобразователя (повышение чувствительности, коэффициента эффективности, уменьшение механических потерь и т.д.). В данной статье рассмотрен метод построения силового преобразователя (СП), имеющем в составе систему адаптивного управления параметрами выходных сигналов с целью получения максимальной эффективности работы УТУ.

В технологических процессах, связанных с обработкой твердых тел ультразвуком, а также при очистке с высокой амплитудой колебания основным технологическим параметром является амплитуда колебаний. В работе [2] показано, что для УП кривая зависимости амплитуды колебаний от входной мощности имеет как линейный (при мощностях не более 0,9 кВт), так и нелинейный участок. С увеличением амплитуды напряжения на входе УП пропорционально растет амплитуда колебаний или акустическая мощность до определенного предела, величина которого определяется усталостной прочностью элементов конструкции УП. В нелинейном режиме с увеличением амплитуды напряжения на входе будет происходить увеличение механических или электрических потерь в УП. Это приводит к уменьшению чувствительности, КПД или коэффициента эффективности. В этом случае за *допустимую амплитуду колебаний* УП принимается такое значение, при котором падение чувствительности или коэффициента эффективности не превышает заданную величину [2].

Известно [3], что пьезоэлектрический и магнитострикционный преобразователи являются резонансными системами. Наибольшая мощность от СП отдается в нагрузку при равенстве частот генератора СП и *резонансной частоты* пьезоэлектрического преобразователя, когда реактивные состав-

ляющие нагрузки (ПЭП) компенсируются и остается только активное сопротивление. Этим фактором и определяется необходимость подстройки частоты генератора СП к изменяющейся частоте нагрузки в процессе использования УТУ.

Структура силового преобразователя УТУ

Исходя из сформулированных требований к построению СП, необходимо обеспечить следующие требования к ультразвуковому генератору (УЗГ):

1. Амплитуда входного напряжения ПЭП должна быть стабильной и регулируемой.
2. Частота этого напряжения (F) должна быть равной резонансной частоте инструмента, прикрепленного к ПЭП, то есть необходимо регулировать F в ходе проведения технологической операции.
3. Система управления СП должна обеспечивать быструю реакцию на изменение выходных параметров ПЭП.

Для обеспечения этих требований предлагается функциональная схема СП, представленная на рис. 1. Данная схема формирует гармонический выходной сигнал при работе транзисторного генератора в ключевом режиме [4], благодаря чему можно достичь высокого КПД. Кроме того, адаптивная система управления СП позволяет поддерживать стабильную заданную амплитуду выходного напряжения (БУ-1) и требуемую резонансную частоту (БУ-2). Изменение номинальных значений элементов силового высокочастотного фильтра ФВЧ дает возможность дополнительно стабилизировать выходное напряжение (в заданном диапазоне) генератора СП при изменении нагрузки.

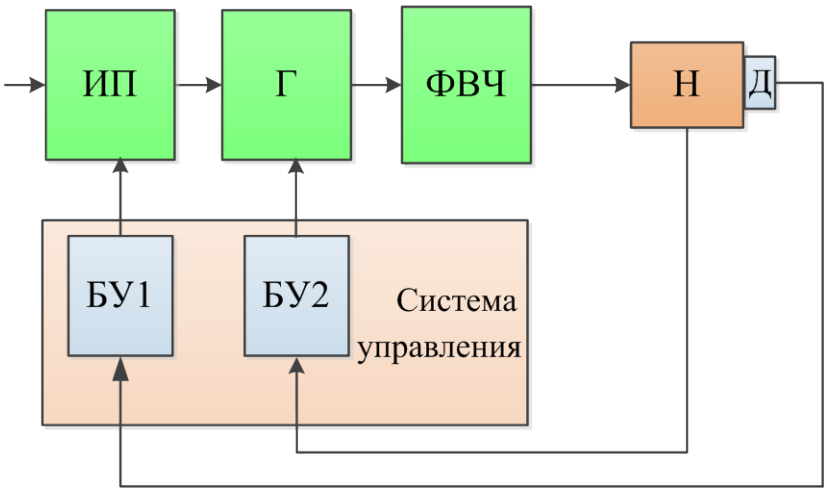


Рис. 1. Функциональная схема СП

Источник питания (рис. 2) служит для обеспечения генератора выпрямленным и сглаженным напряжением сети. Это однофазный диодный мост

с НЧ- фильтром. К его выходу подключен преобразователь постоянного напряжения (ППН) понижающего типа [5]. Он состоит из последовательно включенного транзистора, дросселя и диода, обеспечивающего рекуперацию энергии дросселя в нагрузку. Такая схема обеспечивает:

- Регулирование величины питающего напряжения в диапазоне $0..0{,}9U_м$.
- Уменьшение низкочастотных пульсаций на выходе ППН за счет использование в блоке управления БУ-1 ШИМ - контроллера.
- Защиту от тока перегрузки и перенапряжения.
- Точность поддержания напряжения на входе генератора Г, за счет формирования высокой частоты коммутации транзистора ППН.
- Плавный запуск силового преобразователя.

Для анализа работы СП была составлена схема замещения источника питания с ППН и генератора ВЧ напряжения. К выходным клеммам ППН источника питания подключен генератор Г (рис.1) с амплитудой выходного напряжения равной питающему и периодом, который определяется скоростью переключения двух перекрестных пар транзисторного моста. Для получения гармонического напряжения используется фильтр, состоящий из резонансного колебательного контура L1,C1 и токоограничивающего конденсатора C2 (рис. 2). Нагрузка R1 включается параллельно C1 и является активной. Для определения параметров было проведено моделирование работы схемы в резонансном режиме.

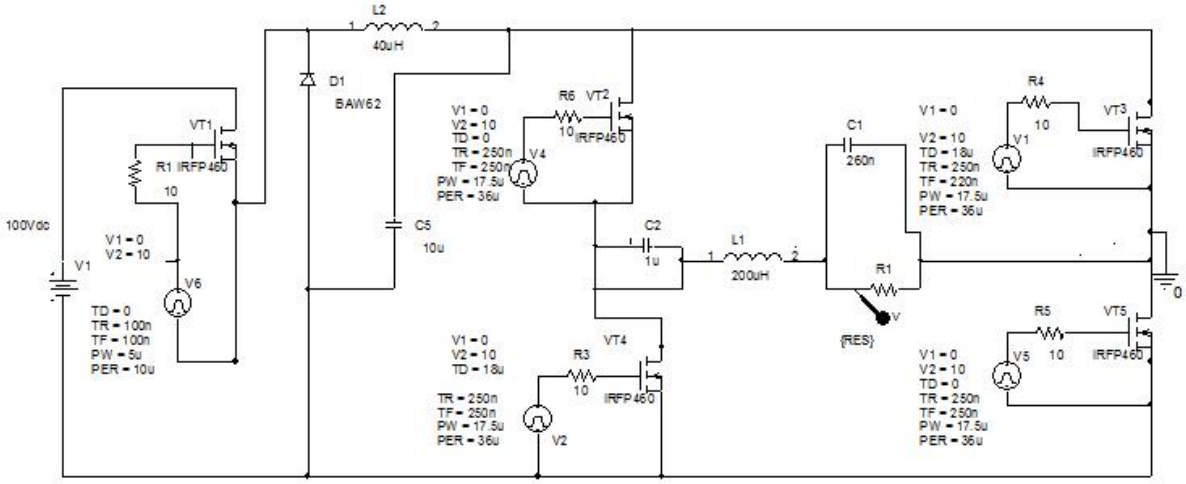


Рис. 2. Схема для моделирования узлов СП.

Результаты моделирования представлены в виде временных зависимостей напряжения на нагрузке при изменении ее сопротивления в диапазоне 25..250 Ом (нижний график рис. 3). На верхнем графике изображены параметрические кривые зависимостей напряжения на нагрузке и мощности (максимальные значения) от ее сопротивления. Используя эти кривые можно выполнять расчет параметров колебательного контура и выбор

транзисторов генератора СП. Более подробные рекомендации по проектированию генераторов приведены в статье [6].

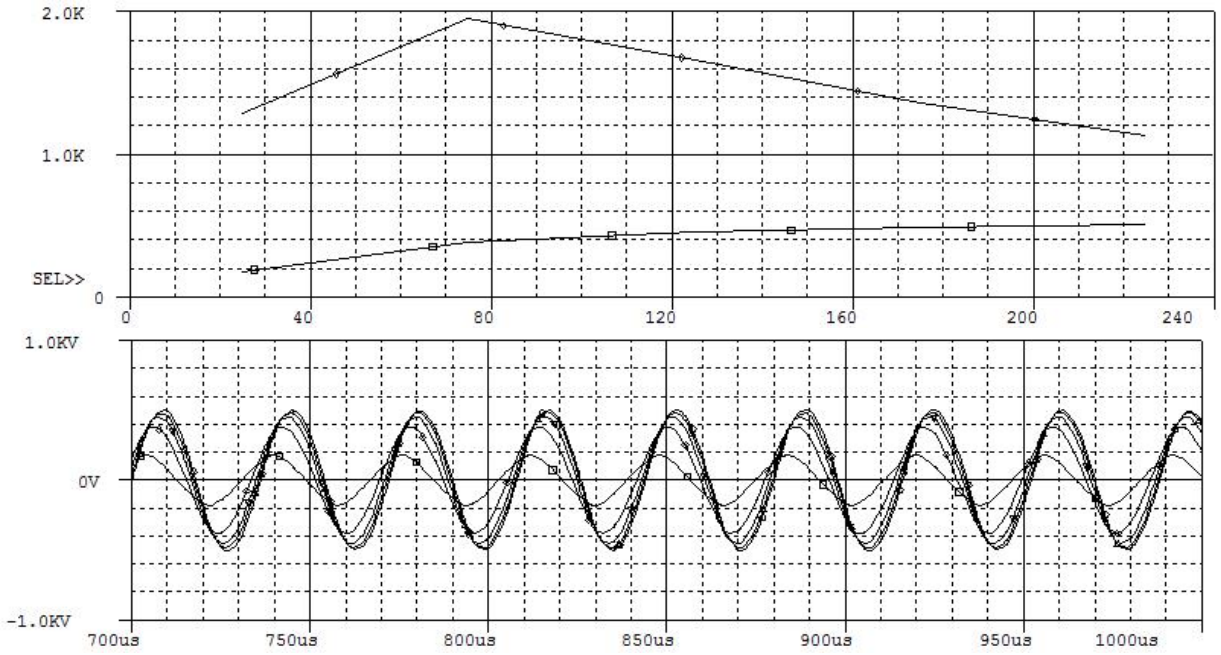


Рис. 3. График временной зависимости напряжения на нагрузке $U_н(t)$ и параметрические кривые $U_н(R_н)$, $P_н(R_н)$).

Выбор параметров работы ПЭП, контролируемых системой управления

Для эффективной работы УТУ, как было отмечено в начале статьи, необходимо контролировать *допустимую амплитуду колебаний* пьезоэлектрического преобразователя и подстраивать частоту гармонического сигнала на выходе генератора СП к *резонансной частоте* ПЭП. В этой связи возникает необходимость в измерении амплитуды колебаний излучающей поверхности колебательной системы и измерения тока через ПЭП, определяя максимальное его значение (резонансный режим).

Современное развитие микроэлектроники дает большой выбор средств для измерения амплитуды колебаний ПЭП. Широко используются оптические методы измерений [7] и разнообразные микроэлектромеханические устройства на основе MEMS - технологии (Micro-Electro-Mechanical Systems) [8]. Для описываемой задачи удобно использовать MEMS-акселерометр, позволяющий преобразовывать значение амплитуды колебания в выходной цифровой сигнал. Например, датчик ADXL350 (фирмы Analog Devices) имеет высокое разрешение (13 разрядов), широкий диапазон измерения и разнообразные интерфейсы. Поскольку предполагается цифровая обработка измеряемых параметров, то выбираем высокоскоростной интерфейс SPI (Serial Peripheral Interface), который формиру-

ет синхронный последовательный поток данных. Выбранный датчик устанавливается на корпусе ПЭП (датчик Д, см. рис. 1).

Для обеспечения максимального КПД при использовании ПЭП в составе технологической установки обычно контролируется ток, измерение которого можно выполнить, например, используя трансформаторный датчик тока. Другой способ контроля резонансного режима связан с использованием фазового детектора, позволяющего выделить фазовое соотношение напряжения на ПЭП и тока протекающего через него [9]. Данный способ удобно использовать для небольших мощностей излучения или как дополнительный контроль к основному (например, контроль по току). Для контроля резонансного значения тока ПЭП необходимо иметь амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) преобразователя. Методика ее определения приведена в работе [2]. АЧХ позволяет задавать исходные данные для системы управления.

Рассмотренный перечень контролируемых параметров и требований по реализации контроля показывает необходимость в адаптивной системе управления. Определим задачи для адаптивной системы:

- Поддержание заданной амплитуды выходного напряжения СП через подстройку уровня питания генератора СП (ШИМ - регулирование). При этом характеристика регулирования может выбираться в зависимости от режима использования УТУ.
- Контроль *допустимой амплитуды колебаний* ПЭП через подстройку величины напряжения питания генератора.
- Контроль резонансного режима ПЭП через подстройку частоты генератора.

Цифровая обработка системы управления выполнена на базе цифровых матриц - программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Преимущества использования такой технологии заключаются в высоком быстродействии матриц, удобной реализации алгоритма управления в виде обработки потоков данных, большим числом библиотечных функций, представленных в виде IP-ядер. Большим преимуществом использования ПЛИС является возможность реконфигурации аппаратной реализации алгоритма неограниченное число раз (а для современных ПЛИС даже «налету»). Кроме того, разработку можно выполнять на языках описания аппаратуры (Verilog, VHDL), что повышает производительность разработки и дает возможность выполнять функциональную и временную симуляцию проекта.

Современные ПЛИС в своем составе содержат средства для эффективной реализации модели вычислений ***data flow –*** цифровые сигнальные процессоры (DSP), которые позволяют вести разработку и реализацию контуров управления высокопроизводительных СП [10].

Задачи цифрового управления нижнего уровня СП, например, процесс управления силовыми ключами при подстройке резонансной частоты, по-

лучение информации по SPI – интерфейсу (от датчика амплитуды колебаний) в реальном времени, требует быстродействия от ПЛИС порядка единиц микросекунд и менее.

Для обеспечения загрузки уставок формирования заданного режима УТУ (в том числе загрузки по локальной сети), можно использовать микропроцессор с сетевыми портами.

Определение информационных потоков системы управления СП

Для разработки системы управления СП необходимо проанализировать информационные потоки, поступающие на вход системы управления и формируемые на ее выходе. Такой анализ удобно выполнять с помощью диаграмм потоков данных (Data Flow Diagrams - DFD), которые можно использовать для разработки спецификации требований при разработке системы. Классическая диаграмма DFD используется для структурного анализа и проектирования информационных систем. Известны несколько широко используемых нотаций DFD [11], отличающихся синтаксисом. Диаграммы описывают источники и потоки данных, представляют процессы и память для хранения результатов обработки потоков данных в процессах. Данные диаграммы нельзя напрямую использовать при анализе информационных потоков систем управления (СУ) силовых преобразователей по следующим причинам:

- Процессы обработки потоков данных должны быть строго детерминированы.
- Каждый процесс, как правило, запускается по определенному условию, поэтому на входе процесса необходимо определить сигналы, формирующие логику условия.

Рассмотрим работу СУ на примере упрощенной диаграммы (рис. 4), дающей возможность проанализировать потоки данных из внешних источников, обработку потоков, логические вычисления и адресаты назначения результатов вычислений. Диаграмма построена на основе узлов обработки данных, названных *капсулами*. Капсула состоит из двух составляющих: *логики условия* и *процесса* обработки потоков данных. Логика условия представляет собой уравнение логической функции, результат решения которого запускает процесс. Процесс осуществляет преобразование входных потоков данных в выходные, формирование управляющих сигналов для других капсул. При этом алгоритм выполнения процесса аппаратно «зашит» в капсулу (инкапсулирован). Каждая капсула может представлять собой иерархию капсул с вложенными процессами.

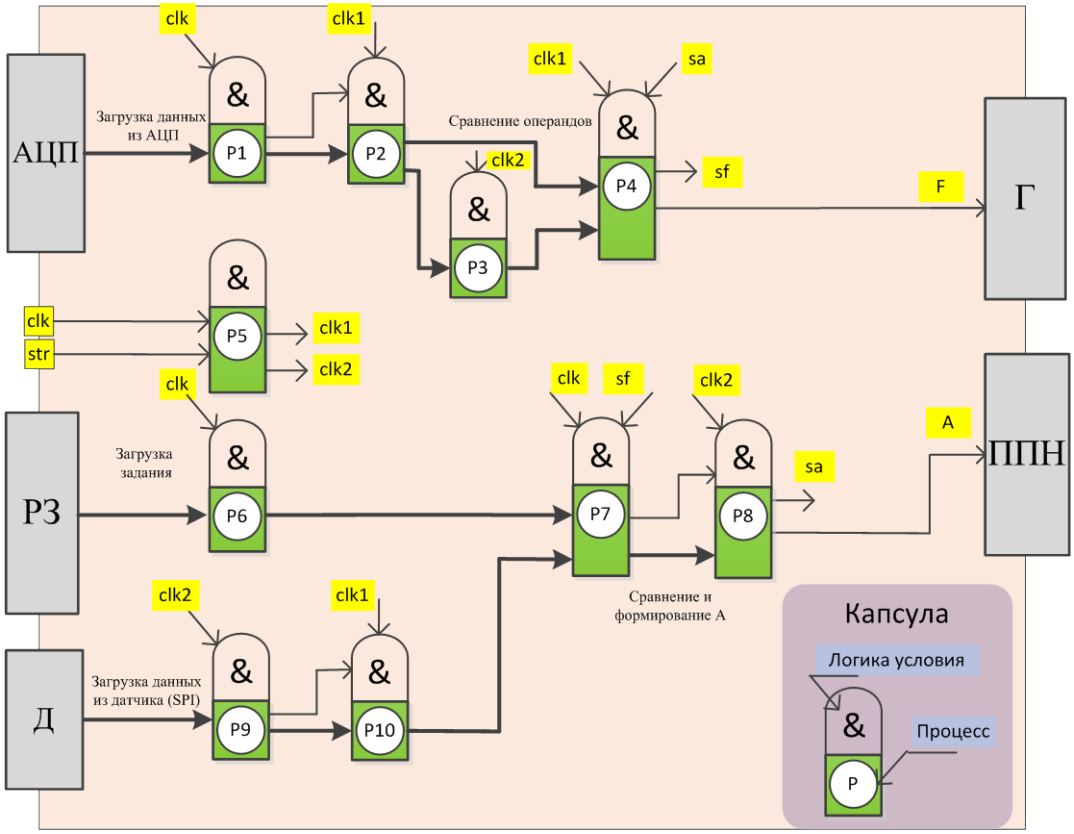


Рис. 4. Диаграмма информационных потоков системы управления СП

Источники входных потоков данных (внешние сущности) рассматриваемой СУ перечислены ниже:

- АЦП – аналого-цифровой преобразователь в тракте контроля тока резонансного режима ПЭП.
- РЗ – регистр задания амплитуды колебания преобразователя.
- Д – датчик контроля допустимой амплитуды колебания ПЭП.

Адресаты результатов обработки потоков:

- Г – генератор СП.
- ППН - преобразователь постоянного напряжения.
- clk – внешнее событие для синхронизации всех процессов.
- str - внешнее событие для инициализации работы СП.

Анализируя представленную диаграмму видно, что на систему управления поступает три независимых потока данных и два события. В результате обработки на выходе формируются два управляющих сигнала:

- F - сигнал задания частоты генератора для резонансной работы ПЭП.
- A - сигнал, обеспечивающий заданную величину питания генератора через РЗ (а соответственно и акустическую мощность), при этом контролируется допустимая амплитуда колебания ПЭП.

Поскольку цифровая часть СУ реализована на ПЛИС, то полученная диаграмма с параллельной обработкой потоков данных без затруднений реа-

лизуется в проекте, для чего необходимо алгоритмы процессов (P1..P10) каждой капсулы описать на языке HDL (например, Verilog).

Результаты построения СП

Для проверки результатов математического моделирования был проведен эксперимент на физической модели СП. Макет его мощностью порядка 500 Вт собран на силовых транзисторах JRF840, с системой управления, реализованной на ПЛИС семейства Cyclone III (фирмы Altera). Колебательный контур генератора имеет следующие параметры: L1 = 200 мкГн, C1 = 230 нФ, C2 = 0. Частота $F = 1/2t_и$, где $t_и$ – полупериод гармоники выходного напряжения ($t_и$ = 20 мкС, F =25 кГц). Испытания проводились при напряжении питании генератора U_d = 20 и 30 В . Внутреннее сопротивление источника питания R_o = 1,56 Ом. В таблице 1 приведены результаты опытов. В данной таблице использованы следующие обозначения сигналов:

- U_d, I_d –напряжение и ток источника питания генератора.
- I_L – ток колебательного контура, который равен току силового транзистора.
- $U_{нм}$ – амплитуда напряжения на нагрузке.
- $P_{н.ср}$ – мощность в нагрузке (среднее значение).

Таблица 1. Результаты проведенного моделирования и испытания на макете

			Модель				Опыт			
№ п/п	$R_н$	U_d	I_d	I_L	$U_{нм}$	$P_{н.ср}$	I_d	I_L	$U_{нм}$	$P_{н.ср}$
1	25	30	0,60	1,30	28	33	0,80	1,50	50	45
2	50	30	0,82	1,90	52	60	0,95	1,90	75	56
3	100	30	1,62	3,00	93	100	2,00	3,20	92	100
4	150	30	1,95	4,00	124	125	2,40	4,20	85	110
5	200	30	2,30	4,70	147	120	2,50	4,90	155	110
6	100	20	1,50	2,90	66		0,70	2,10	33	90

Анализ приведенных данных показывает неплохую сходимость модельных результатов и результатов опыта (расхождение не превышает 25%). Большие отклонения некоторых значений можно отнести за счет случайных погрешности.

Разработана схема силового преобразователя для УТУ с улучшенными показателями по стабильности выходного напряжения генератора и точности его подстройки, а также с контролем допустимой амплитуды колебаний технологического инструмента. Предложена структура адаптивной системы, позволяющая повысить эффективность работы технологической установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петушко И.В. Оборудование для ультразвуковой обработки. Научное издание. СПб.: ООО «Андреевский издательский дом», 2005 г.
2. Казанцев В.Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок. М.: Машиностроение, 1980. - 44 с.
3. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л.Д. Розенберга. - М.: Наука, 1970. - 688 с.
4. Козырев В.Б., Лаврушенков В. Г., Леонов В. П. и др. Транзисторные генераторы гармонических колебаний в ключевом режиме/ Под ред. И. А. Попова. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.
5. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. –М.:Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
6. Дягилев В.И., Набоков С.А., Александров Е.С., Выбор параметров генератора синусоидального высокочастотного напряжений. Ежемесячный журнал «Молодой ученый». Чита, 2011 г. №6(29), 189 с. (с.45-49)
7. Макаров Л.О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии, - М: Машиностроение 1983.
8. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение./Пер. с анг. Под ред. Заболотной Ю.А. – М.:Техносфера, 2004.
9. Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве.- Барнаул: АлтГТУ, 2007.- 400 с.
10. Jinghong Guo, Stephen H. Edwards, Dushan Borojevic Implementing Dataflow-based Control Software for Power Electronics Systems - Proc. IEEE 9th Workshop on Computers in Power Electronics (COMPEL) , 2002.
11. Дэвид А. Марка, Клемент Л. МакГоуэн. Методология структурного анализа и проектирования (SADT). - М.: МетаТехнология, 1993.- 240 с.

УДК 621.793; 687.05

С.А. Егоров, И.А. Свиридов, М.А. Шакуров

СНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИГЛЫ ПРИ ШИТЬЕ



Егоров Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент
Ивановская государственная текстильная академия, Россия,
г. Иваново, E-mail:esa@igta.ru



Шакуров Максим Алексеевич,
Ивановская государственная текстильная академия, Россия,
г. Иваново, E-mail:tmp@igta.ru



Свиридов Игорь Александрович,
Ивановская государственная текстильная академия, Россия,
г. Иваново, E-mail:tmp@igta.ru

Аннотация

Предлагается игла с покрытием и способ снижения температуры при шитье. Пластичное покрытие острия иглы уменьшает энергию воздействия осевой силы удара при прокалывании. Энергия упругой деформации идет на нагрев острия иглы. Отвод тепла осуществляется в покрытие, которое имеет фазовый переход при температуре, близкой к температуре разрушения нити, что приводит к частичному расплавлению верхних слоев и повышению их подвижности.

Ключевые слова: швейная игла, металлические покрытия, фазовый переход

S.A. Egorov, I.A. Sviridov, M.A. Shakurov

THE REDUCTION TEMPERATURE OF NEEDLE AT NEEDLEWORK

Dr. Sergey A. Egorov[1], e-mail:esa@igta.ru;
Max A. Shakurov[1], e-mail: tmp@igta.ru;
Igor A. Sviridov[1], e-mail:tmp@igta.ru.
[1]Ivanovo state of textile academy, Russia

Abstract

The needle is offered with covering and way of the reduction of the temperature at needlework. Plastic covering the edge of the needle reduces the energy of the influence of axial power of the blow. The Energy to springy

deformation goes on heating of the edge of the needle. The Tap of the heat is realized in covering, which has a phase transition at the temperature, close to the temperature of the destruction to threads that brings about partial melting the upper layers and increasing to their mobilities.

Key words: sewing needle, metallic covering, phase transition

Пошив лент и ремней синтетическими нитями на промышленной швейной машине приводит к значительному разогреву иглы. Снижение температуры в зоне образования стежка уменьшает обрыв и повышает производительность шитья.

Установлено [1, 2], что основной разогрев швейной иглы происходит в результате удара острия, сопровождающегося упругой, а иногда и пластической деформацией. Движение иглы сквозь сшиваемый материал сопровождается сопротивлением проникновению и вызывает трение, которое также вызывает нагрев. Повышение температуры иглы приводит к повышению текучести синтетической капроновой нити и обрыву.

Патентный поиск показал некоторые из возможных способов решения проблемы. К ним относят: обдув зоны образования стежка воздухом [3, 4], а также нанесение покрытий на швейную иглу[5, 6, 7].

В качестве покрытий игл швейной машины используют нитрид титана, дисульфид молибдена, твердый аморфный алмазоподобный углерод и полимеры. В некоторых случаях изготавливают сложные покрытия с подложкой. Под покрытием расположен промежуточный адгезионный слой, при этом толщина покрытия составляет 0,05 – 0,5 мкм, а толщина промежуточного адгезионного слоя составляет 0,1 толщины покрытия [5, 6, 7].

Недостатки обдува состоят в необходимости дополнительных устройств, которые загромождают рабочее место оператора. Нанесение многослойного покрытия – это сложная технология, которая повышает стоимость игл в несколько раз. Алмазоподобные покрытия обладают низкой теплопроводностью, а также осыпаются.

Все способы, кроме обдува, несущественно снижают температуру нагревания иглы и используют дефицитные материалы для покрытий. Снижение температуры происходит за счет снижения силы трения между иглой и прошиваемым материалом.

Цель работы, предложить покрытие иглы, отличающееся лучшим сцеплением с металлом иглы и большим поглощением выделяемой тепловой энергии.

Были проведены исследования, которые выявили температурный диапазон нагрева иглы при шитье лент и ремней. Для этого методом полуискусственной термопары сняли показания нагрева иглы в результате шитья капроновой ленты.

На иглу, вблизи острия, приваривалась электродуговым способом

копелевая проволока, а между колбой иглы и проволокой устанавливали контакты, которые подключали к графопостроителю. Затем, проводилось шитье и регистрировалась разница потенциалов. Предварительно термопара была проградуирована. В момент разрыва верхней нити шитье останавливалось и по термограмме фиксировалась температура. Таким образом, было установлено, что температура, при которой происходит разрушение нити, соответствует 240± 5°С.

Увеличить теплообмен поверхности иглы можно за счет увеличения ее теплопроводности, увеличения ее теплоемкости. Работы по определению влияния свойств поверхности на теплообмен в процессе трения были проведены ранее [8, 9]. Дополнительно теплоемкость поверхности увеличивается в том случае, если происходит фазовое превращение с поглощением тепла. Предложено покрывать поверхность острия иглы сплавами, претерпевающими фазовые переходы при нагреве до температуры, при которой происходит обрыв нити при шитье.

Затем, определили возможные металлы и сплавы, которые имеют фазовые переходы в данном температурном диапазоне. Изготовили иглы с различными покрытиями методом окунания в расплав в импульсном магнитном поле. Остриё иглы покрывали оловом (температура плавления 232°С, теплоемкость 250 Дж/(кг·°С)) и сплавом олова и свинца марки ПОССу30-0,5 (температура начала плавления 183°С, полное расплавление 255°С, теплоемкость 170 Дж/(кг·°С). Толщина покрытия составила 20-30 мкм.

Испытания покрытий были проведены на промышленной швейной машине 48 кл. ПМЗ, прошивалась техническая капроновая лента арт. 141. Во время исследований замерялось время нагрева до t = 240°С и количество стежков до момента оплавления стачиваемого материала. Данные испытаний приведены в таблице.

Были испытаны различные варианты покрытий, и различные по площади покрытия. Пластичное покрытие острия иглы уменьшает энергию воздействия осевой силы удара при прокалывании. Энергия упругой деформации идет на нагрев острия иглы. Отвод тепла осуществляется в покрытие, которое имеет фазовый переход при температуре, близкой к температуре разрушения иглы, что приводит к частичному расплавлению верхних слоев и повышению их подвижности. Снижается работа силы трения, что уменьшает нагрев полимерной нити при шитье.

В результате исследований установлено, что применение иглы с покрытием сплавом олова и свинца снижает обрывность швейных ниток на 20%. По результатам испытаний оформлен патент [10].

Таблица

Количество стежков до оплавления

№№ п/п	Разновидность игл	Время нагрева иглы до t = 240°С, сек	Среднее количество стежков до момента оплавления нити
1	2	3	4
1	Игла без покрытия	12	86
2	Игла с покрытием дисульфидом молибдена	15	109
3	Игла с покрытием оловом по всей длине поверхности	12	86
4	Игла с покрытием оловом на 1/2 длины поверхности	17	121
5	Игла с покрытием оловом на острие	19	140
6	Игла с покрытием сплавом олова и свинца на острие	21	154

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игла для швейной машины / Егоров С.А., Шакуров М.А., Свиридов И.А., Свиридов А.Г. // Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности (Прогресс – 2010) [Текст]: сб. мат. межд. науч.-техн. конф. Ч. 2. - Иваново: ИГТА, 2010. – С. 45 – 47.
2. Егоров С.А., Шакуров М.А. Влияние теплопроводности упрочняющих покрытий на износ // Сб. мат. межвуз. науч.-техн. конф. аспир. и студ.: Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности (Поиск-2011).– 26-28 апр. 2011. : сб. мат. в 2-х ч.– Иваново, 2011. – Ч.2. – С. 188–189.
3. Патент 4305339 США, D05B 71/00. Сборка вихревой трубы для охлаждения иглы швейной машины/ Р. Лесли, патентообладатель «Вортек». – заявл. 28.09.79; опубл. 15.12.81.
4. Авторское свидетельство 1701767 СССР, D05B 71/04. Приспособление для охлаждения иглы швейной машины/ А.Г. Свиридов, С.Н. Шипин, Е.А. Санталова, В.В. Уточкина – 1701767 А1; заявл. 09.11.89; опубл. 30.12.91, Бюл. № 48. – 3 с.
5. Свидетельство на полезную модель 9848 Российская Федерация, МПК6 D 05B85/00. Игла швейной машины/ И.Ш. Трахтенберг, А.Б. Владимиров, А.В. Пашеев, Б.М. Овсянников, Р.Я. Овсянников. –

98106752/20; заявл. 14.04.1998; опубл. 16.05.1999. – 5 с.
6. Авторское свидетельство 250656 СССР, МКЛ2 Д 05 В 85/12. Способ снижения температуры нагрева игл на швейных машинах/ И.К. Гапошин, С.К. Ященко, Э.В. Муравьев. – 1073653/28-12; заявл. 28.04.66; опубл. 25.05.76, Бюл. № 19. – 1 с.
7. Патент 2062290 Российская Федерация, МПК6 C10M147/04, C10N30:06. Антифрикционная композиция/ В.К. Савинков, И.З. Фридбург; заявитель и патентообладатель АОЗТ «Амтек». - №94016428/04; заявл. 29.04.1994; опубл. 20.06.1996. – 6 с.
8. Егоров С.А., Шакуров М.А. Электроэрозионное упрочнение кулачковых механизмов // Защитные и специальные покрытия, обработка поверхности в машиностроении и приборостроении: Сб. статей VII Всероссийской науч.-практ. конференции. – Пенза: ПДЗ, 2010. – С. 28 – 30.
9. Егоров С.А. Упрочнение кулачковых механизмов // Физика, химия и механика трибосистем: межвуз. сб. науч. тр./под ред. В.Н. Латышева. – Иваново: ИвГУ, 2010.–Вып. 9. – С. 122–124.
10. Патент на полезную модель 93809 Российская Федерация, U1 МПК D05B 85/12. Игла для швейной машины/ С.А. Егоров, И.А. Свиридов, М.А. Шакуров. – 2009149579/22; заявл. 30.12.2009; опубл. 10.05.2010, Бюл. №13, - 2 с.

УДК 669.295

Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, С.Б. Белова, Е.Н. Егоров

ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ



Юлия Борисовна Егорова, д.т.н., профессор
МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского
г. Москва, Тел.: 9175568258, E-mail: egorova_mati@mail.ru.



Людмила Васильевна Давыденко, к.т.н., доцент
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
г. Москва, Тел.: 9261167666, E-mail: mami-davidenko@mail.ru.



Светлана Борисовна Белова, к.т.н., доцент
МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского
г. Москва, Тел.: 9104534825, E-mail: sb-belova@rambler.ru.



Евгений Николаевич Егоров, к.т.н., доцент
МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского
г. Москва, Тел.: 9175568258, E-mail: aravir_ene@mail.ru.

Аннотация

Дана характеристика титановых сплавов, приведены существующие и перспективные направления использования титановых сплавов в автомобилестроении.

Ключевые слова: применение титановых сплавов, автомобилестроение, высокая удельная прочность, коррозионная стойкость.

J.B. Egorova, L.V.Davidenko, S.B. Belova, E.N. Egorov

TITANIUM ALLOYS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Dr. Julia B. Egorova[1], e-mail: egorova_mati@mail.ru;
Dr. Lyudmila V. Davidenko[2], e-mail: mami-davidenko@mail.ru;
Dr. Svetlana B. Belova[1], e-mail: sb-belova@rambler.ru;
Dr. Evgenie. Egorov[1], e-mail: aravir_ene@mail.ru.
[1]MATI –Russian Technological University, Russia;
[2]Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), Russia.

Abstract

In current article you can find characteristic of titanium alloys, present and perspective tendency of using titanium alloys in the area of motor car construction.

Key words: titanium alloys application, motor car construction, high specific strength, corrosion stability.

Титан и его сплавы относятся к числу тех металлических материалов, которые начали производить и применять в промышленных масштабах после второй мировой войны в связи с развитием новой техники, прежде всего авиационной, космической и ракетной. Это обусловлено уникальным комплексом их свойств: малой плотностью, достаточной прочностью, необычно высокой коррозионной стойкостью.

Чистый титан обладает довольно высокой температурой плавления (1668°С); температура его кипения составляет 3169°С. По плотности, равной 4,505 г/см^3 при комнатной температуре, он занимает промежуточное место между железом и алюминием (табл. 1). Титан и титановые сплавы обладают исключительно высоким сопротивлением коррозии, превышающим коррозионную стойкость нержавеющих сталей, что обусловлено образованием на поверхности титана плотной оксидной пленки [1-3]. Титан и его сплавы устойчивы во всех природных условиях: атмосфере, почве, пресной и морской воде, даже в условиях жаркого влажного морского климата. В морской воде за 4000 лет растворился бы слой титана, равный по толщине листу писчей бумаги [1].

Таблица 1

Сопоставление уровня прочности сталей, титановых и алюминиевых сплавов [1-3]

Класс сплавов		$\sigma_в$, МПа	ρ, г/см^3	$\sigma_в/\rho$, МПа · см^3/г
Титановые сплавы	Малопрочные	400-700	4,5-4,55	88,4-154,6
	Средней прочности	700-1000	4,4-4,5	157-225
	Высокопрочные	>1000	4,65-4,75	>213
Алюминиевые сплавы	Малопрочные (термически неупрочняемые)	130-300	2,7	48,1-114
	Средней прочности (термически упрочняемые)	350-500	2,85	123-175
	Высокопрочные	>500	2,85	>175
Стали	Углеродистые	300-700	7,8	38,5-89,7
	Малолегированные (малопрочные)	400-850	7,8	89,7-109
	Среднелегированные (средней прочности)	850-1500	7,8	109-192
	Высокопрочные	>1500	7,8	>192

Титан высокой чистоты обладает малой прочностью и высокой пластичностью ($\sigma_в \approx 240$ МПа; $\delta \approx 60$ %; $\psi \approx 70$ %) [1-3]. Для получения заданных механических свойств его легируют алюминием, ванадием, марганцем, молибденом, хромом, железом и некоторыми другими элементами. К настоящему времени разработано несколько сотен опытных композиций и более сотни промышленных сплавов различного назначения с разным уровнем механических свойств [1, 4]. Временное сопротивление разрыву промышленных титановых сплавов может изменяться в пределах от 400 МПа для малолегированных мягких сплавов до 1500-1600 МПа для высоколегированных термически упрочненных сплавов (табл. 1, 2). Титановые сплавы способны сохранять прочностные свойства до сравнительно высоких температур. Наилучшие жаропрочные титановые сплавы могут работать до температур 600-650°С. Вместе с тем некоторые титановые сплавы могут применяться для работы при криогенных температурах, вплоть до температуры жидкого водорода.

Сравнительно небольшая плотность в сочетании с довольно высокими прочностными характеристиками обеспечивает титановым сплавам более высокую удельную прочность (отношение прочностных характеристик к плотности $\sigma_в/\rho$) в широком интервале температур по сравнению с алюминиевыми сплавами, сталями и жаропрочными никелевыми сплавами (табл. 1). Именно это обстоятельство является решающим фактором для применения титана в авиационной и аэрокосмической технике.

Однако титан и сплавы на его основе можно применять также в самых различных областях машиностроения [1, 2, 5-7]. Благодаря развитию крупного оптимизированного производства он стал более доступным и экономически выгодным материалом. По мнению журнала «Metall Bulletin Months» (июль, 2003 г.) титан становится все более «домашним», так как значительно возросло его использование для изготовления ювелирных украшений, автомобильных и велосипедных деталей, спортинвентаря, кухонных принадлежностей, очков, корпусов часов и зонтов и т.п.

Высокие эксплуатационные характеристики в совокупности с современными технологическими и производственными достижениями открывают широкие возможности для его использования в автомобилестроении [5-11]. Судя по количеству докладов, представленных на Международных конференциях по титану (2003, 2007, 2011 гг.), интерес к титану, как автомобильному материалу, особенно сильно возрос, начиная с 2000-х гг. К 2007 г. объем производства впускных и выпускных титановых клапанов, пружин, шатунов, деталей выхлопных систем исчислялся миллионами штук [6].

К титановым сплавам, используемым в автомобилестроении, предъявляют следующие требования [8]: а) высокая прочность; б) сохранение функциональных характеристик деталей в различных системах автомобиля; в) безопасность, длительный срок эксплуатации деталей; г)

повторное использование титана, обусловленное возможностью переплава деталей после их износа. Надежность автомобильных деталей из титана и его сплавов проверена использованием в авиационной и космической технике, а также применением в гоночных автомобилях [8].

Таблица 2

Химический состав и механические свойства отечественных титановых сплавов [1-4]

Марка сплава	Химический состав	Класс	ПФ*	ТО**	Механические свойства	
					$\sigma_в$, МПа	δ, %
1	2	3	4	5	6	7
Малопрочные сплавы						
ВТ1-00	99,6 Ti	α	л	о	300-450	30
ВТ1-0	99,5 Ti	α	л	о	400-550	30
ОТ4-0	1Al-1,5Mn	псевдо-α	л	о	500-650	30
ОТ4-1	2Al-1,5Mn	″ - ″	л	о	600-750	20
ОТ4-1В	3Al-2,5V	″ - ″	л	о	600-750	≥15
ПТ-7М	2Al-2,5Zr	α	т	о	480-680	≥20
Сплавы средней прочности						
ВТ5-1	5Al-2,5Sn	α	л	о	750-900	15
ОТ4	4Al-1,5Mn	псевдо-α	л	о	700-900	15
ОТ4В	4,75Al-2,5V	псевдо-α	л	о	700-900	≥10
ПТ3В	4Al-2V	″ - ″	л	о	700-900	≥11
ВТ6С	5Al-4V	α+β	л	о	850-1000	12
ВТ6	6Al-4V	″ - ″	Пр	о	920-1070	10
ВТ20	6Al-2Zr-1Mo-1V	″ - ″	л	о	950-1080	8
ВТ14	5Al-3Mo-1,4V	″ - ″	л	о	900-1070	8
ВТ16	2,5Al-5Mo-4,5V	″ - ″	Пр	о	850-950	14
Высокопрочные сплавы						
ВТ18У	6,5Al-4Zr-0,5Mo-1Nb-2Sn-0,15Si	псевдо-α	Пр	о	950-1150	10
ВТ8	6,5Al-3,5Mo-1,3Sn-1,3Zr-0,2Si	α+β	Пр	о	1000-1200	8
ВТ9	6,5Al-1,5Zr-3Mo-0,3Si	″ - ″	Пр	о	1000-1250	7
ВТ3-1	6Al-2,5Mo-1,5Cr-0,5Fe-0,3Si	″ - ″	Пр	о	1000-1200	10
ВТ25У	6,5Al-3,8Mo-3,8Zr-2Sn-0,8W-0,3Si	α+β	Пр	о	1050-1250	10
ВТ23	5,5Al-2Mo-4,5V-0,3Cr-0,6Fe	″ - ″	л	з+с	1400	5
ВТ22	5,5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe	псевдо-β	Пр	о	1050-1300	8
ВТ22И	2,5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe	″ - ″	Пр	о	1000-1250	12
ВТ19	3Al-5,5Mo-3,5V-5,5Cr-1Fe	″ - ″	л	з+с	1400	7
ВТ32	2,5Al-8,5Mo-8,5V-1,2Fe-1,2Cr	″ - ″	л	з+с	1350	8
ВТ35	15V-3Cr-3Sn-3Al-1Mo-1Zr	″ - ″	л	з+с	1200-1400	6

Примечания: ПФ* -полуфабрикат: л – лист; пр – пруток; ТО** - термическая обработка: о – отжиг; з+с – закалка + старение.

В табл. 2 приведены наиболее характерные механические свойства различных отечественных титановых сплавов, применение которых возможно в автомобилестроении. По данным исследований, проведенных в Центральном научно-исследовательском автомобильном и автомоторном институте (НАМИ), Научно-исследовательском институте автотракторных материалов (НИИАТМ), Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) и Научно-исследовательском институте титана, для деталей автомобилей и двигателей рекомендованы следующие титановые сплавы [10, 12]: для несущих конструкций автомобилей — сплавы средней прочности марок ОТ4-1; ВТ5-1, ОТ4, ВТ5, ВТ6; для ходовой части автомобилей — сплавы средней прочности и высокопрочные сплавы марок ВТ6, ВТ3-1, ВТ8, ВТ5-1, ВТ14, ВТ15, ВТ16; для деталей двигателей —высокопрочные и жаропрочные сплавы марок ВТ3-1, ВТ8, ВТ14, ВТ15, ВТ16, ВТ18У.

Помимо серийных сплавов, активно разрабатывают новые титановые сплавы автомобильного назначения. К ним, в частности относится жаропрочный сплав системы Al-Mo-Zr-Si-Y, специально разработанный для изготовления клапанов двигателя [13]. В ВИАМ разработана концепция создания экономнолегированных титановых сплавов на основе системы Ti-Fe-O-N [14]. Новый сплав Ti-1,5Fe-0,49O-0,05N имеет высокий комплекс механических свойств ($\sigma_в$=1000 МПа, δ=20%), обладает высокой коррозионной стойкостью и может применяться в автомобилестроении.

В табл. 3 приведены существующие и перспективные направления использования титановых сплавов для изготовления деталей автомобиля [5, 6, 8]. Применение высокопрочных титановых сплавов позволяет повысить мощность автомобильных двигателей из-за уменьшения массы деталей возвратно-поступательных систем. Изготовление шатунов из титановых сплавов приводит к снижению на 30% нагрузки на шатунные подшипники, что значительно повышает их надежность и долговечность [5, 8]. Титановые шатуны, применяемые в двигателях спортивных автомобилей Honda NSX V6, обеспечили повышение оборотов на 700 об/мин по сравнению со стальными шатунами и снизили на 30% массу деталей [5].

Применение титановых сплавов в автомобилях позволяет сделать их более экологически чистыми благодаря сокращению количества выхлопных газов при использовании выхлопных фильтров, изготовленных из спеченного титанового порошка, турбо- и каталитических преобразователей для усиления процесса сгорания топлива, устройств для полной ликвидации выхлопных газов с помощью сплавов-накопителей водорода на основе титана [5, 6, 8].

Специфические особенности и необычные функциональные характеристики специальных титановых сплавов существенно расширяют область их использования. Например, алюминиды титана и сплавы на их

основе обладают высокой жаропрочностью, жаростойкостью и сопротивлением износу [15]. Впервые алюминиды титана были использованы для изготовления деталей двигателя гоночного автомобиля Формулы-1 в 2001 году [16]. В Германии в настоящее время этот сплав является одним из основных для изготовления автомобильных клапанов [5, 6].

Таблица 3

Обзор существующих и возможных областей применения титановых сплавов в автомобилестроении [8]

Критерии применения	Титановые сплавы	Область применения
Масса, коррозионная стойкость, жесткость, деформуемость, внешний вид	Технический титан	Теплообменники, системы выхлопных газов, кондиционирования воздуха, радиаторы, конструкционные детали, элементы жесткости, спойлеры
Масса, высокотемпературная прочность, сопротивление окислению, износостойкость, жесткость	α+β-сплавы, алюминиды титана	Детали двигателя (клапаны, шатуны, кулачковые валы, болты, кривошипные валы); компоненты трансмиссий (шестерни, валы, сателлиты, болты); компоненты сцепления (корпусы, диски сцепления),пружины клапанов и шасси;системы выхлопных газов, предохранительные диски, втулки, оси, рычаги, инструмент
Масса, высокая прочность, пружинные характеристики, деформируемость в холодном состоянии	β-сплавы	Пружины клапанов, пружины шасси
Жаропрочность	Алюминиды титана	Турбонагреватель
Масса, коррозионная стойкость	Сплавы системы титан-ниобий	Титановые крепления с пластиком
Эффект запоминания формы	Сплавы системы титан-никель	Детали управления (пружины) для распределения масла в автоматических трансмиссиях, системы кондиционирования воздуха
Топливные баки малых объемов и массы	Сплавы-аккумуляторы водорода, сплавы систем титан-железо, титан-марганец	Топливные баки (нулевая эмиссия)

Сплав титан-ниобий имеет хорошую способность к холодной деформации, высокое сопротивление коррозии; из него можно изготавливать детали крепежа для соединения титана с пластиками и армированным углеродным волокном [8].

Из сплавов с памятью формы на основе никелида титана TiNi изготавливают детали, которые в процессе эксплуатации выполняют повторяющиеся операции под воздействием температурных изменений и

применяются, например, в коммутационных устройствах. В автомобильной промышленности Японии значительная часть титановых деталей изготавливается из таких сплавов. Фирма Kanto Special Steel (Япония) разработала с использованием TiNi-сплавов карбюратор, в котором воздушная заслонка меняет форму в зависимости от температуры эксплуатации [6].

В настоящее время производство титановых сплавов для автомобилестроения особенно интенсивно развиваются в Японии и Китае [5-7, 17]. В 2007 г. безусловным лидером здесь являлась компания Nippon Steel Corporation. Со второй половины 90-х гг. продажи титана и его сплавов в японский автомобильный сектор значительно увеличились, а за 2006 г. объем поставок национальным и зарубежным автомобилестроителям составил 1600 тонн. Компания начала продвижение титана и его сплавов в автомобильной отрасли в начале 90-х годов с производства подвесных рессор и клапанов для двигателей двухколесной техники, постепенно переходя на различные детали автомобилей.

Одним из первых японских серийных автомобилей, оснащенных титановыми деталями (клапанами цилиндров), был Toyota Altezza. Для впускных клапанов был использован сплав Ti-6Al-4V, для выпускных – IMI834. В результате этого вес клапанов снизился на 40% по сравнению со стальными, максимальная частота оборотов увеличилась на 700 об/мин, а шум уменьшился на 30% [16].

В 2009 году на Токийском автосалоне был представлен один из самых легких спортивных автомобилей Lexus LFA. Кузов Lexus LFA сделан из алюминия, титана и углеродного волокна, в двигателе дорожной версии LFA используются титановые клапаны и шатуны, в результате чего достигнуто снижение массы автомобиля до 1485 кг [21].

За прошедшие 10-15 лет Nippon Steel Corporation запатентовала около 120 своих разработок, связанных с применением титана и титановых сплавов в автомобильной промышленности. К ним относится и разработка новых титановых сплавов, например, таких как сплавы Super - TIX®10CU (Ti-1%Cu) и Super - TIX®10CUNB (Ti-1%Cu-0,5%Nb) [17, 20]. Листы из этих сплавов имеют довольно высокие прочностные характеристики, сопротивление усталости, коррозионную стойкость, при этом обладают хорошей технологической пластичностью. Сплавы предназначены для изготовления выхлопных систем автомобилей NISSAN GT-R EGOIST, AUDI TTS, Porsche 997 GT3 [7, 17].

Американская компания Titanium Metals Corp. (Timet) создала специальное подразделение Timet Automotive для обслуживания автомобильной промышленности и обеспечения ее растущих потребностей в титановых полуфабрикатах и деталях [9]. Помимо производства стандартных сплавов, Timet разрабатывает новые титановые сплавы, созданные специально для автомобильного рынка. Для изготовления

деталей выхлопных систем был разработан сплав TIMETAL Exhaust XT (Ti-0,5Fe-0,6Si-0,15O) [16]. Глушители и выхлопные трубы из этого сплава весят в два раза меньше, чем аналогичные детали из стали, и имеют срок службы 12-15 лет.

Идеальным вариантом для автомобильных пружин считают сплавы TIMETAL LCB (Ti-6,8Mo-4,5Fe-1,5Al) и Ti-38-644 (Beta C; Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr) [5]. Для сплава Ti-38-644, имеющего оптимальное сочетание плотности и модуля упругости, разработана специальная технология (прокатка + холодное волочение + старение), которая обеспечивает хорошие свойства на кручение. В 2002 году американская автомобильная промышленность использовала 1100 тонн титана (в 1995 году - 100 тонн) для изготовления клапанов двигателей, шатунов, выхлопных систем, шпилек для установки ободьев колес, подвесных рессор [9].

По данным китайских исследователей и представителей компании Goldsun Metal объем титановых полуфабрикатов в 1990 г. составил 50 т, в 1997 г. - 500 т, 2002 г. – 1100 т, 2009 г. – 3000 т, что существенно опережает темпы роста производства Японии и США [18].

Основным препятствием к внедрению титана и его сплавов в автомобилестроении является их высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами. Это связано с трудностями извлечения титана из руд, его плавки и переработки слитков в полуфабрикаты и изделия, а также с высокой стоимостью титановой губки. Не последнюю роль здесь играет и плохая обрабатываемость резанием высокопрочных титановых сплавов, особенно сплавов на основе алюминидов титана.

Эти затруднения могут быть преодолены благодаря разработке более дешевых сплавов, более широкому использованию отходов титана в производстве, совершенствованию технологии обработки и производства. В частности, при выплавке слитков для деталей спортивного автомобиля Chevrolet Corvette Z06 американская компания Titanium Metals Corp (Timet) применяет электронно-лучевую плавку, что позволяет использовать все побочные продукты и отходы аэрокосмической отрасли и снизить стоимость конечного продукта [19]. В Японии разработан новый α+β-сплав KS Ti-4,5Al-4Cr-0,5Fe-0,2C с экстремально низким напряжением течения при горячей обработке давлением, который при этом имеет хорошую обрабатываемость резанием, что позволило существенно снизить стоимость деталей автомобиля. В Китае интенсивно разрабатывают дешевые титановые сплавы для автомобилестроения [5, 6]. Для повышения эффективности механической обработки титановых сплавов и в нашей стране, и за рубежом разработано достаточно большое число способов, обзор которых рассмотрен в работах [11,12].

В будущем области применения титана и его сплавов в автомобилестроении, несомненно, будут расширяться, так как реализованы

далеко не все возможности использования их привлекательных и часто уникальных свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. - 520 с.
2. Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. - М.: ВИЛС, 2000. – 316 с.
3. Елагин В.И., Колачев Б.А., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. 4-е издание. - М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
4. Различные виды классификации отечественных титановых сплавов / Егорова Ю.Б. [и др.] // Титан. - 2012. - №2 (36). - С.11-18.
5. Titanium′ 2003. Sci. and Technol. Proc. 10th World Conf. on Titanium. - Hamburg, Germany, 13-18 July 2003. - Vol. 1-5. - 3425 pp.
6. Titanium′ 2007. Sci. and Technol. Proc. 11th World Conf. on Titanium. - Kioto, Japan: Japan Institute of Metals, 3-7 June 2007. - Vol. 1-2. -1765 pp.
7. Titanium′ 2011. Sci. and Technol. Proc. 12th World Conf. on Titanium. - Beijing, China, 19-25 June 2011. - Vol. 1-3.
8. Фишер Д., Зибум Х. Применение перспективных титановых сплавов в автомобилестроении// Титан – 1993. - № 1. - С. 82-85.
9. Targeting titanium-using automarkers [Электронный ресурс] // American Machinist. 2002. Vol. 146. N.1. P. 22, 24. URL: http: //americanmachinist.com/casebooks/targeting-titanium-using-automakers. (дата обращения: 22.03.13)
10. Титан в машиностроении [Электронный ресурс] URL: http: //npotitan.ru/spravka/primenenie-tittana/mashinostroenie/ (дата обращения: 21.03.2013)
11. Титан и титановые сплавы в автомобилестроении / Егорова Ю.Б. [и др.] //Автомобильная промышленность. - 2010. - № 10. - С. 41-43
12. Промышленное освоение технологии изготовления цельнокатаных титановых заготовок для сборного автомобильного колеса. / Зиновьев В.Н. [и др.] // Титан. - 1998. - № 1 (10) - С. 68-70.
13. Борбашов В.М., Дрогалин К.О., Москвичев Ю.П., Панин В.И. Клапан двигателя внутреннего сгорания, способ его изготовления и жаропрочный титановый сплав для него. Патент RU 2244135 C2, 2003.
14. Ночовная Н.А., Исаичев А.В., Анташев В.Г. Проблемы создания экономичных титановых сплавов и пути их решения // Все материалы. Энциклопед.справочник. – 2008. - № 5 - С.10-15.
15. Полькин И.С., Гребенюк О.Н., Саленков В.С. Интерметаллиды на основе титана // Технология легких сплавов. – 2010. - № 2 – С. 5-15.

16. Froes F.H., Yu K. Emerging application for titanium. //Titanium′ 2003. Sci. and Technol. Proc. 10th World Conf. on Titanium. - Hamburg, Germany, 13-18 July 2003. - Vol. 5. - P. 2999-3010.
17. Рошке И. Nippon Steel лидирует по продажам титана в автомобилестроении [Электронный ресурс] URL: http://www.sogra.ru (дата обращения: 21.03.2013)
18. Titanium and titanium alloy in automotive applications [Электронный ресурс] URL: http://www.goldsunmetal.com/show.asp?id=265 (дата обращения: 27.03.2013)
19. Kurt A. Kuster. New production technology makes titanium attractive to automakers [Электронный ресурс] // http://americanmachinist.com/shop-operations/titanium-takes-road (дата обращения: 21.03.2013)
20. Otsuca H. Development of new titanium alloy sheets for automobile exhaust systems with excellent formability and heat resistance // Titanium Japan. – 2012. - Vol.60. - N. 2. - P.126-131.
21. Tamura C., Kuroda M., Scirabe T. The use of titanium materials for Lexus LFA // Titanium Japan. – 2010. - Vol.58. - N. 3. - P.201-203.
22. Способы повышения эффективности механической обработки титана и его сплавов/ Егорова Ю.Б. [и др.] // Материаловедение. - 2012. - № 7. - С.8-12.
23. Methods of increasing efficiency of machinability of titanium and titanium alloys/ Egorova J.B. [and oth.] //Inorganic Materials: Applied Research. - 2013. - Vol. 4 - N. 1. - P. 46-51.

УДК 519.1: 655.1

А.В. Иванов, В. В. Ваганов, К.А. Котов

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ СИНТЕЗА СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПОЛИГРАФИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ



Александр Васильевич Иванов, д.т.н., профессор, начальник Управления информационных ресурсов
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)5527526, E-mail: ivanov@mediabooks.ru.



Вячеслав Владимирович Ваганов, к.т.н. профессор, заместитель зав. кафедрой "Полиграфические машины"
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)2944215, E-mail: prvaganov_spb@mail.ru.



Константин Анатольевич Котов, соискатель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)352-47-46, E-mail: konstantan515@mail.ru.

Аннотация

В рамках рассматриваемого подхода оптимизация полиграфического производства обеспечивается поиском кратчайшего пути реализации заказов в пространстве попарных связей между элементами технологического оборудования полиграфического производства.

Ключевые слова: Производственная система, цикл, заказ, план, алгоритм, кротчайший путь, задача, граф, оценка.

A.V. Ivanov, V.V. Vaganov, K.A. Kotov

DEVELOPMENT OF SYNTHESIS ALGORITHMS OF STRUCTURE OF PROCESSING EQUIPMENT, AT THE PRINTING ENTERPRISE

Prof. A.V.Ivanov[1], e-mail: ivanov@mediabooks.ru;
Prof. V.V. Vaganov[1] , e-mail: prvaganov_spb@mail.ru;
K.A. Kotov[1], e-mail: konstantan515@mail.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Within a considered approach optimization of printing production is provided with search of the shortest way of implementation of orders in space of paired communications between elements of processing equipment of printing production.

Key words: Production system, cycle, order, plan, algorithm, the mildest way, task, count, assessment.

1. Введение

В связи с возрастающей конкуренцией на полиграфическом рынке, становится актуальной проблема повышения эффективности работы полиграфического предприятия за счет внедрения систем управления производством. Основными задачами создания и внедрения подобных систем являются: оформление и расчет полиграфического заказа, подготовка производственной документации, планирование и диспетчеризация производства, производственный учет, расчет плановой и фактической себестоимости, планирование расхода материалов, учет бумаги, материалов, готовой продукции и контроль за прохождением заказов (on-line) [1]. Одной из ресурсоемких и важных задач по своему вкладу в эффективности работы полиграфического предприятия является диспетчеризация. Под диспетчеризацией, в первую очередь, подразумевается оптимизация и синхронизация выполнения параллельных технологических операций по изготовлению элементов полиграфической продукции для сокращения длительности технологического цикла производства и обеспечения оптимальной загрузки оборудования. Таким образом, производственная система и производственные заказы могут быть представлены в виде сетевых взаимодействующих конструкций. А изучение сети связанных этапов производства того или иного вида полиграфической продукции с учетом различной стоимости переходов и производства на различных элементах технологического парка полиграфического производства основано на использовании аппарата теории графов.

2. Постановка задачи

Дано:

1. Множество V - перечень полиграфической продукции $V = \{v_i\}$, $i=1,\ldots,n$, n – общее количество единиц полиграфической продукции в перечне (плане).

2. Множество P связей $P = \{p_{ij}\}$, $i,j=1,\ldots,n$, $i \neq j$, между реализациями элементов продукции в технологическом цикле, где p_{ij} - стоимость перехода к j-му этапу реализации продукции при условии реализации i-го этапа, p – зависит от производительности единицы технологического оборудования

полиграфического производства. Множество P может быть получено в соответствии с технической документацией производства или методом экспертных оценок. Множество единиц полиграфической продукции и множество связей между этапами их производства в виде ориентированного атрибутивного графа $G = (V,P)$, где вершины - $V = \{v_i\}$, $i=1,\ldots,n$, n – общее количество единиц полиграфической продукции в перечне (плане), а семейство пар $p_{ij} = (v_i, v_j)$, $v_i, v_j \in V$ - ребра графа.

3. Множество D номенклатуры технологического оборудования $\{d_s\}$, $s = 1,\ldots,U$, где U – общее количество единиц технологического оборудования;

4. Каждому элементу множества D номенклатуры технологического оборудования может быть поставлено в соответствие подмножество покрываемых элементов множества единиц полиграфической продукции V, при этом общая эффективность полиграфического производства может быть посчитана.

Требуется:

1. Синтезировать алгоритм, формирующий перечень элементов из множества D номенклатуры технологического оборудования (в зависимости от начальной производственной единицы технологического оборудования), при котором, сумма стоимостей (в стоимостном или временном исчислении) переходов по этапам реализации продукции, являющихся вершинами графа G должна быть минимальной. Критерием эффективности производственной системы, в данном случае, является наличие подмножества $\{d_{s'}\}$, $s' = 1,\ldots,U'$, $U' \subset U$ где U' – мощность подмножества состава технологического оборудования, полностью покрывающего вершины графа G, принадлежащие маршруту (или нескольким маршрутам) реализации продукции:

$$\begin{gathered} \{d_{s'}\} \rightarrow \{v_j\},\ s' = 1,\ldots,U', \\ \{v_j\} \rightarrow \{p_{ik}\},\ j=1,\ldots,n', \\ \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} p_{ik} = \min, \end{gathered} \qquad (1)$$

где p_{ik} - стоимость наступления v_j-го этапа производства полиграфической продукции при условии реализации v_k-го этапа, k – индексы этапов, являющихся атрибутами вершин графа G;

v_j – этап, являющийся атрибутом вершин графа G, принадлежащих кратчайшему маршруту реализации продукции в пространстве $\{p_{ij}\}$;

n' – количество вершин принадлежащих маршруту реализации продукции в производственной системе.

2. При заданной реализации начального этапа продукции определить этапы в вершинах графа G, реализация которых наименее затратная (в стоимостном или временном исчислении).

3. При заданном начальном этапе производства оценить стоимость реализации продукции находящейся в конечной заданной вершине (стоке) графа.

4. Определить методику и критерий отбора единиц технологического оборудования в соответствии с рассчитанными стоимостями реализаций этапов полиграфической продукции.

3. Алгоритмы поиска

Из множества алгоритмов поиска кратчайшего пути интерес представляют алгоритмы, которые на различных этапах выбора из альтернативных звеньев маршрута выбирают дугу с наименьшей стоимостью перехода между этапами производства заданной продукции (рис. 1). Т.е. начинаем обход из заданной вершины графа (в нашем случае, заданного начального этапа) и на каждом шаге выбираем ближайший по стоимости и не противоречащий технологии производства. В настоящее время для решения такой задачи существуют математически обоснованные алгоритмы, однако сложность их решения экспоненциально зависит от сложности исходных данных (количества вершин графа в исходной модели). Поэтому все эти алгоритмы с точки зрения практики имеют лишь теоретический интерес. Для практического применения в настоящее время используются лишь приближенные алгоритмы решения задачи поиска кратчайшего пути.

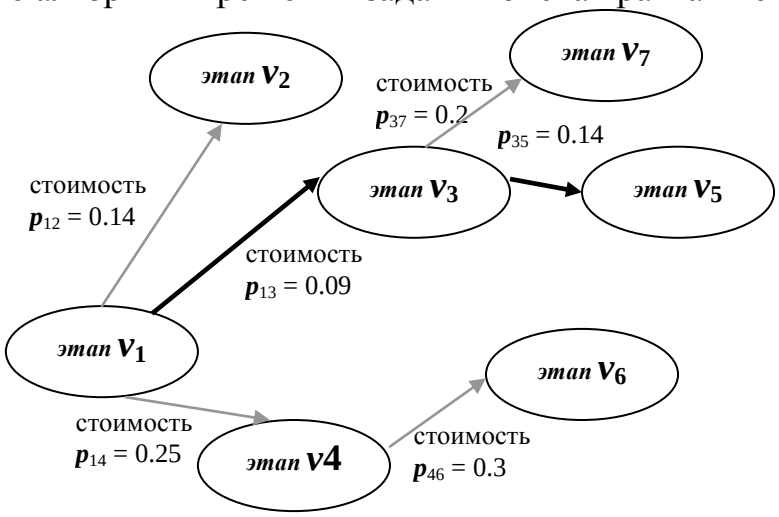


Рис. 1. Необходимое условие применимости алгоритмов поиска кратчайшего пути – выбор наименее затратной дуги на каждом шаге. Маршрут реализации продукции: *этап* v_1 -> *этап* v_3 -> *этап* v_5 ->… привязан к номенклатуре и производительности единиц технологического оборудования

Одними из таких алгоритмов являются быстрый приближенный алгоритм ближайшего соседа и алгоритм Дейкстры.

Для задачи с неравенством треугольника известно, что алгоритм ближайшего соседа является асимптотически сходящимся, т.е. он сходится к оптимальному решению по вероятности с ростом числа n вершин (Э.Гимади) и для конкретных значений n результат превышает точное решение не более чем в $\frac{1}{2}(\lceil \log_2 n \rceil + 1)$ раза [40]. Алгоритм ближайшего соседа один из немногих эвристических алгоритмов решения задачи коммивояжера, для которого допускается $p_{ij} \neq p_{ji}$, где p_{ij} –вес пути из i–й вершины в j–ю вершину.

Начиная из некоторого начального состояния v_0, в качестве следующего состояния v_1 выбирается такое состояние, не равное v_0, для которого вес кратчайшего пути является наименьшим из всех весов кратчайших путей из v_0 в другие состояния. Аналогично, в качестве состояния v_2 выбирается состояние, не равное v_0 и v_1, с наименьшим весом кратчайшего пути по сравнению с другими кратчайшими путями из v_1 в другие состояния. В итоге строится цепочка из n различных состояний, обеспечивающая обход графа G. При этом вес маршрута реализации этапов производства равен весу кратчайших путей, использованных при построении цепочки $v_0 v_1 \ldots v_{n-1}$, а сам маршрут получается соединением использованных кратчайших путей в порядке их прохождения (рис. 2).

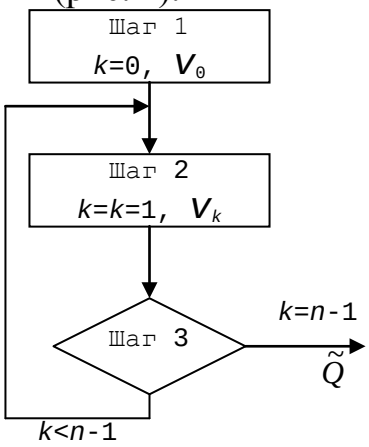


Рис. 2. Алгоритм ближайшего соседа по шагам

1. В качестве текущего частичного маршрута $\tilde{Q}$ выбрать начальное состояние v_0, положить k=0.
2. Если $\tilde{Q} = v_0 v_1 \ldots v_k$ – частичный маршрут, то в качестве v_{k+1} (k<n-1) выбрать состояние из множества $Q_k = \{v_1,\ldots,v_n\} \setminus \{v_0, v_1, \ldots, v_k\}$, для которого выполняется условие:

$$p(v_k, v_{k+1}) = \min p(v_k, v_i), \quad v_i \in Q_k. \tag{3.2}$$

Если имеется несколько состояний, удовлетворяющих условию (3.2), то выбор одного из них производится по любому правилу. Образовать

новый частичный маршрут, дописав v_{k+1} к уже имеющемуся маршруту. Положить $k=k+1$.

3. Если $k=n-1$, то в качестве решения задачи выдать частичный маршрут реализации этапов производства $\tilde{Q}= q_0q_1\ldots q_k$. В противном случае перейти к шагу 2.

Для поиска наименее затратного маршрута реализации продукции используем иногда целесообразно использовать второй из наиболее эффективных алгоритмов в теории графов – алгоритм Дейкстры [2,3].

Суть алгоритма состоит в следующем. Каждому состоянию a графа прохождения этапов производства продукции G соответствует определенное положительное число $v(a)$ - вес состояния, который равен сумме весов всех дуг, входящих в путь из начального состояния a_0 в состояние a. В любой момент времени вес $v(a)$ не меньше веса кратчайшего пути из a_0 в состояние a. В процессе выполнения алгоритма веса состояний уменьшаются до тех пор, пока они не сравняются с весом соответствующего кратчайшего пути.

Алгоритм Дейкстры реализуется в два этапа:

1. Вычисление весов кратчайших путей;
2. Построение самих этих путей.

В процессе вычислений по обоим алгоритмам важно не только построение алгоритма, но и оценка возможности его реализации. Для этого оценивается:

1. объём памяти, занимаемый алгоритмом;
2. зависимость объема памяти, занимаемой промежуточными данными, от объема исходных данных;
3. зависимость времени вычислений от объема исходных данных.

При оценке вычислительной сложности все алгоритмы делятся на два класса.

1. Полиномиальные алгоритмы, это такие алгоритмы, для которых верхняя оценка функции сложности пропорциональна некоторому полиному n^k, т.е. $\overline{S(n)}\sim n^k$, где n - объем исходных данных, k= 1,2,3,… - некоторое фиксированное число.

$$\overline{S(n)}=O(n^k) \Rightarrow \lim_{n\to\infty}\frac{\overline{S(n)}}{n^k}=1.$$

2. Экспоненциальные алгоритмы, функция сложности которых имеет нижнюю (чаще всего) или верхнюю оценку, пропорциональную экспоненциальной функции a^n, т. е. $\underline{S(n)}\sim a^n$, где $a>1$- некоторое вещественное число.

Будучи близкими по объёму вычислений в области малых объёмов исходных данных, полиномиальный и экспоненциальный алгоритмы существенно различаются в области больших n (рис. 3).

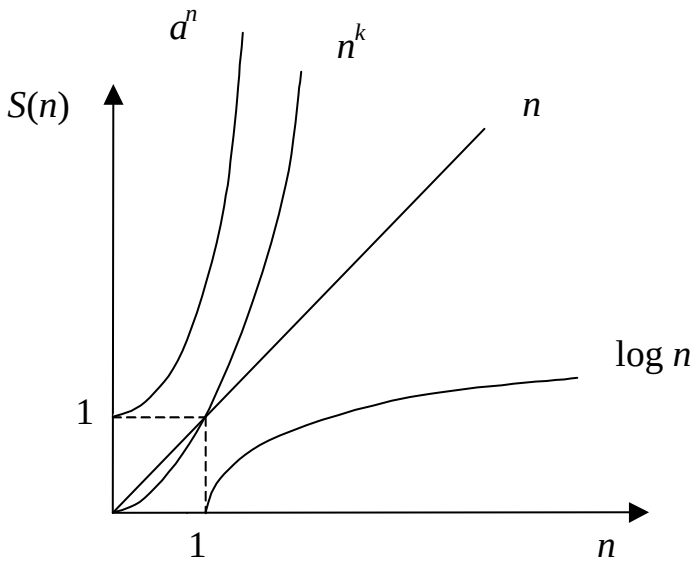


Рис. 3. Рост времени вычислений от объема исходных данных для различных алгоритмов

В качестве примера приведем таблицу (табл. 1), характеризующую время решения задачи при различных функциях сложности алгоритмов и времени выполнения элементарной операции $\Delta t_э$=1 мкс

Табл. 1. Время решения задачи при различных функциях сложности алгоритмов

n / O(n)	20	50	100	200	500	1000
1000n	0.02с	0.05с	0.1с	0.2с	0.5с	1с
100n^2	0.04с	0.25с	1с	4с	25с	2мин
n^5	3.2с	5.2мин	2.8час	3.7сут	1год	31.7лет
2^n	1с	35лет	3×10^6лет	-	-	-
3^n	58мин	2×10^6лет	-	-	-	-

Приведем оценки вычислительной сложности алгоритмов определения наименее затратного пути реализации полиграфической продукции на графе производственной системы.

Алгоритм Дейкстры.

Пусть граф содержит n состояний и взвешенные дуги. В качестве элементарной операции выступает сравнение двух символов (или слов), наибольшее число сравнений на каждом шаге пропорционально объему исходных данных n, количество шагов также пропорционально n. В итоге верхняя оценка вычислительной сложности $\overline{S(n)}$=O(n^2).

Алгоритм ближайшего соседа.

Нахождение оптимального маршрута, проходящего по всем n этапам, равносильно перебору из всего количества перестановок из n элементов. Общее число возможных перестановок из n элементов равно n!. В настоящее время отсутствует обоснованный критерий, позволяющий заранее от-

брасывать неперспективные обходы (перестановки). По этой причине для решения задачи коммивояжера необходимо делать перебор по всем возможным обходам (перестановкам) n этапов. По формуле Стирлинга получаем:

$$n! \cong n^n \sqrt{2\pi n} \exp(-n + \frac{1}{12} n - \frac{1}{360} n^2 + ...) \quad \text{при } n \to \infty.$$

Отсюда время работы алгоритма экспоненциально зависит от n, т.е. алгоритм решения задачи коммивояжера является экспоненциально сложным.

Напомним, что по вычислительной сложности задачи делятся на:

- легко решаемые (*P*- полные задачи), алгоритмы решения которых являются полиномиальными;
- трудно решаемые (*NP*- полные задачи), все известные алгоритмы их решения являются экспоненциальными.

Среди трудно решаемых задач можно выделить такие, для которых доказана невозможность построения полиномиального алгоритма, и такие, для которых невозможность полиномиального алгоритма не доказана, но они не построены. В настоящее время большинство специалистов считают, что *NP*-полные задачи не имеют полиномиальных алгоритмов решения.

4. Заключение

Таким образом, разработанные алгоритмы синтеза оптимального состава технологического оборудования, реализующего этапы полиграфического производства на основе определения наименее затратного маршрута реализации заказа представляются, наиболее эффективными в производственных системах с разнообразным набором многофункционального оборудования, позволяющим реализовывать на технологической единице множество видов полиграфической продукции. В статье произведена оценка эффективности алгоритмов синтеза оптимальной последовательности этапов реализации заказов на основе поиска кратчайшего технологического пути по методам ближайшего соседа и Дейкстры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев В.Н.Интегрированные системы проектирования и управления: учеб. пособие / В.Н. Агеев, П.К. Иванов, В.В. Ковалева; Моск. гос. ун-т печати. — М.: МГУП, 2008. — 248 с.
2. Г. Джонсон. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. – М.: Мир, 1984.-256с.
3. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. Одностадийные системы. –М.:Наука, 1975. -360с.

УДК 785.51

С.Г. Иванов, И. А. Гармаева, М.А. Гурьев, А.М. Гурьев

ОСОБЕННОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ



Сергей Геннадьевич Иванов, к.т.н., докторант
ФГОУ ВПО «Алтайский Государственный Технический Университет им. И.И. Ползунова»
Россия, г. Барнаул
E-mail: serg225582@mail.ru



Ирина Анатольевна Гармаева, к.т.н., докторант
ФГОУ ВПО «Алтайский Государственный Технический Университет им. И.И. Ползунова»
Россия, г. Барнаул



Михаил Алексеевич Гурьев, к.т.н., главный металлург
ООО «Литпром»
Россия, г. Барнаул
E-mail: gurievma@mail.ru



Алексей Михайлович Гурьев, д.т.н., профессор, зав. кафедрой
ФГОУ ВПО «Алтайский Государственный Технический Университет им. И.И. Ползунова»
Россия, г. Барнаул
E-mail: gurievam@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены механизм формирования и состав многокомпонентных диффузионных боридных покрытий на сталях.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, упрочнение, борирование.

S.G. Ivanov, I.A. Garmaeva, M.A. Guriev, A.M. Guriev

FEATURES OF MULTICOMPONENT SATURATION ALLOYED BY THE STEELS

Sergey G. Ivanov[1], e-mail: serg225582@mail.ru;
Irina A. Garmaeva[1]; Michael A. Guriev[2], e-mail: gurievma@mail.ru;
Prof. Alexey M. Guriev[1], e-mail: gurievam@mail.ru.
[1]I.I.Polzunov Altai State Technical University, Russia,
[2]JSC Litprom, Russia.

Abstract

In work are considered the mechanism of formation and structure of multi-component diffusive boridny coverings on steels.

Key words: chemical heat treatment, hardening, borating.

В условиях современного производства к материалам инструмента предъявляются все более жесткие требования в части поверхностной прочности, износостойкости и других эксплуатационных характеристик. Диффузионные покрытия на основе бора зачастую обладают набором требуемых свойств: высокая поверхностная твердость, износостойкость, коррозионная и тепловая стойкость. Данная работа посвящена исследованию влияния состава насыщающей смеси и технологических параметров процесса насыщения на микроструктуру и свойства боридных слоев на легированных сталях. В качестве объектов исследования были выбраны стали 5ХНВ, 5ХНВМ и Х12М.

Поверхностная структура в исследуемых сталях преимущественно формируется тремя химическими элементами: железом, бором и углеродом. Железо является основным элементом насыщаемого сплава, бор – основным легирующим элементом на поверхности, углерод присутствует в количестве, введенном в сталь. Изображение микроструктур борированной и боротитанированной штамповой стали 5ХНВ представлено на рис. 1 и 2.

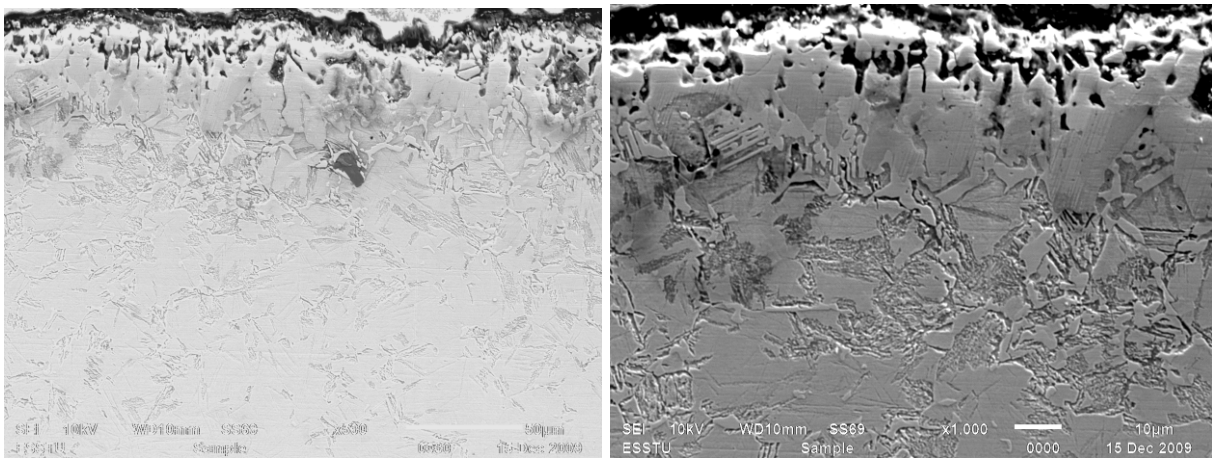


Рис. 1. Микроструктура боридного слоя на штамповой стали

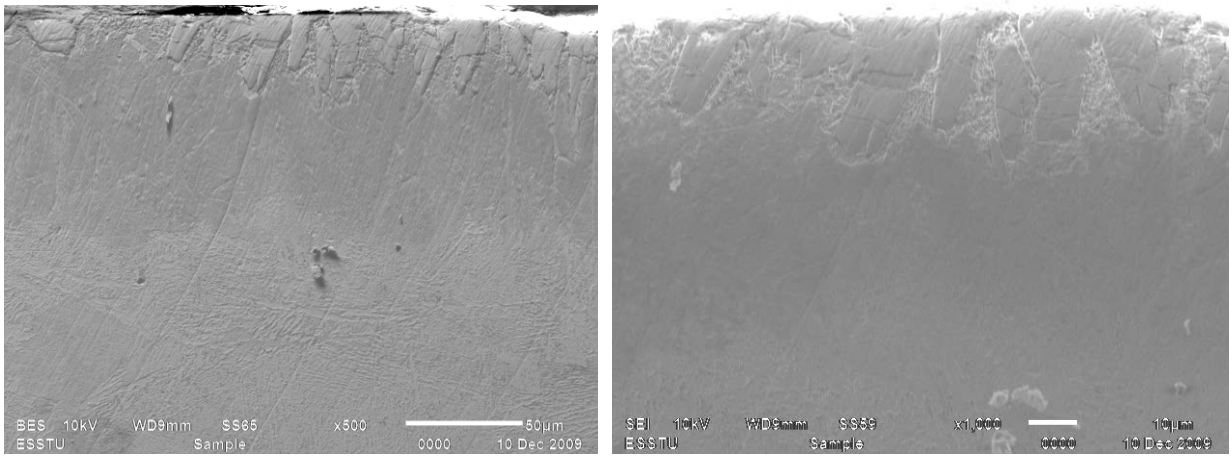


Рис. 2. Микроструктура боротитанированного слоя на штамповой стали

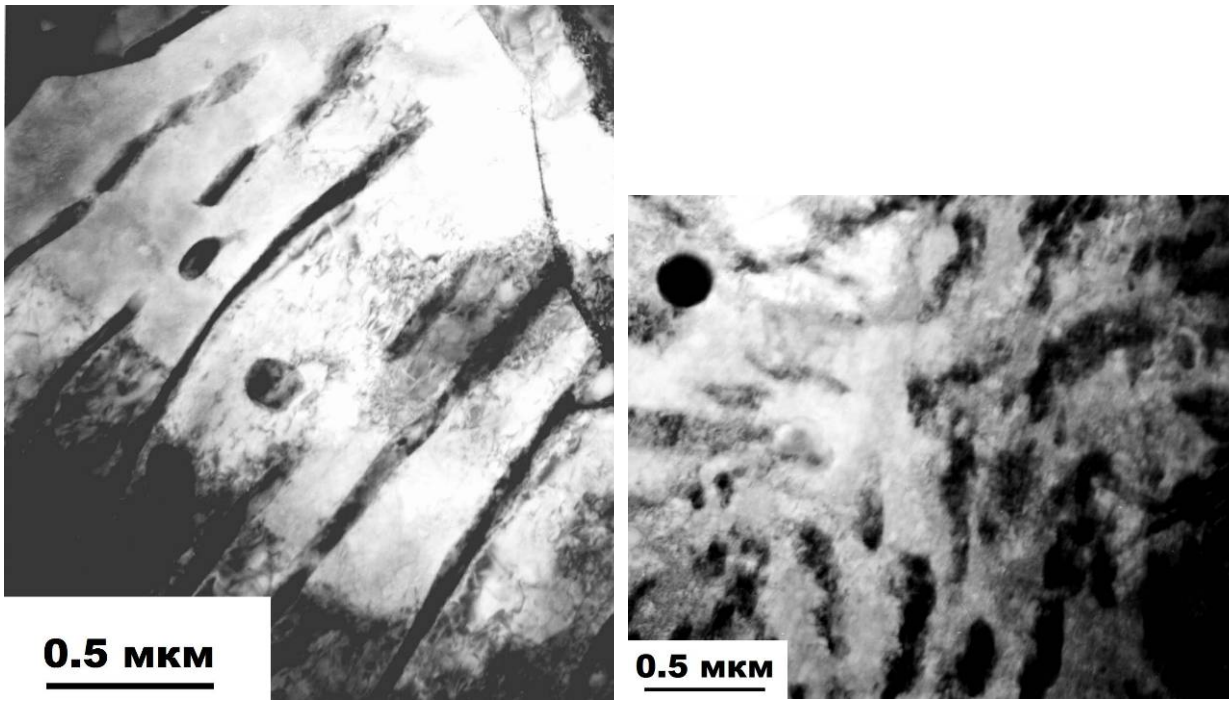
Равновесие в системе Fe – B в процессе диффузионного насыщения ведет к образованию трех диаграммных и стабильных боридов: FeB, Fe_2B и Fe_3B. Кроме вышеперечисленных, отмечено присутствие метастабильного борида $Fe_{23}B_6$, обладающего кубической структурой. Отметим, что в отличие от твердых растворов углерода в железе, твердые растворы бора в железе, как в γ, так и в α и δ, крайне ограничены в силу малой растворимости бора в железе.

Помимо бинарных фаз FeB, Fe_2B, Fe_3B, Fe_3C, в исследованиях наблюдались тройные фазы: $Fe_3(C,B)$ и $Fe_{23}(C,B)_6$ и конечно феррит. Карбиды Fe_3C и $Fe_{23}C_6$ изоморфны боридам Fe_3B и $Fe_{23}B_6$. Поэтому легко образуются тройные фазы соответствующей симметрии, а именно, $Fe_3(C,B)$ и $Fe_{23}(C,B)_6$.

Следовало бы ожидать присутствие фаз B-C, а именно, B_4C, $B_{13}C_2$, B_mC_n, а также другие варианты присутствия карбида бора. В настоящем исследовании карбиды бора не обнаружены. Обусловлено это как узкими областями существования карбидов бора, так и небольшим количеством углерода в поверхностных слоях сталей с учетом их обезуглероживания в процессе борирования.

Фазовый состав диагностировался по дифракционным картинам, полученным двумя способами: 1) рентгеновскому дифракционному анализу и 2) дифракционной электронной микроскопии.

Борированный цементит $Fe_3(C,B)$, и обычный цементит Fe_3C хорошо различаются морфологически. До проникновения бора в кристаллическую решетку цементита он имеет четкую пластинчатую структуру (рис. 3, а). После проникновения бора и формирования борированного цементита морфология этой фазы меняется – вместо совершенных слоев образуется полуразрушенная структура (рис. 3, б).



а) б)

Рис. 3. Микроструктура обычного (а) и борированного (б) цементита.

Пластины цементита при борировании фрагментируются и образуют осколки пластин, что хорошо видно на представленном рис. 3. При борировании объемная доля цементита возрастает. Это обусловлено тем, что внедрившийся в цементит бор вовлекает в него дополнительную долю железа. Наличие борированного цементита во всех исследуемых в работе сталях подтверждается и данными рентгеноструктурного анализа.

При одновременном комплексном насыщении бором и титаном диффузионный слой претерпевает незначительные изменения (рисунок 2) – образуется двухслойная структура, верхняя часть которого состоит из столбчатых боридных кристаллов, легированных титаном, а нижняя (более темная) часть представляет собой смешанные карбобориды железа и титана. Причем в данной зоне присутствует до 22% титана и порядка 0,47% углерода. Такое распределение элементов вероятно является результатом как встречной диффузии углерода из глубины металла так и диффузией углерода с поверхности металла в результате вытеснения его бором. На механических свойствах данная особенность сказывается как повышение микротвердости боридных игл на величину порядка 17–22% и переходной зоны на величину порядка 25–35%, что в свою очередь несколько влияет на износостойкость боротитанированных сталей. В остальном же химический состав и микроструктура переходной зоны практически не отличается от борированной.

При борировании стали Х12М образуются слои, имеющие высокое содержание легирующих элементов, причем при одновременном насыще-

нии бором и хромом процесс диффузии идет достаточно слабо: по результатам элементного анализа поверхности упрочненного образца, содержание хрома остается практически неизменным по отношению к неупрочненной стали. Максимальная концентрация бора в диффузионном слое не превышает 18%. В случае одновременного боротитанирования элементный состав диффузионного покрытия изменяется в более значительных пределах: содержание хрома снижается с 12,04 % до 10,5 %, концентрация титана при этом увеличивается с 0,16% до 14,72%. Наибольшей концентрации титан достигает в приповерхностном слое, концентрируясь в основном на дефектах кристаллического строения и границах зерен металла, а также в межигольчатых интервалах, незначительное количество титана легирует бориды железа. Для получения более полной картины распределения элементов и фазового строения диффузионного слоя необходим рентгеноструктурный анализ и микроэлектронограмма фаз, позволяющие с высокой степенью достоверности установить фазовый состав, кристаллическое строение и химические формулы отдельных составляющих упрочняющего боридного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механизм образования боридных игл при диффузионном комплексном борохромировании из насыщающих обмазок. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Грешилов А Д., Земляков С.А. Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2011. № 3. С. 34-40.
2. Особенности формирования структуры диффузионного слоя на литой стали при химико-термической обработке Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Махаров Д.М., Мосоров В.И., Черных Е.В., Гурьева О.А., Иванов С.Г. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2005. Т. 2. № 1. С. 39-41.
3. Особенности диффузии атомов бора и хрома при двухкомпонентном насыщении поверхности стали Ст3. Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9. № 1. С. 86-88.
4. Механизм диффузии бора, хрома и титана при одновременном многокомпонентном насыщении поверхности железоуглеродистых сплавов. Гурьев А.М., Иванов С.Г. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 3. С. 92-96.
5. Влияние параметров борохромирования на структуру стали и физико-механические свойства диффузионного слоя. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Лыгденов Б.Д., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Гармаева И.А. Ползуновский вестник. 2007. № 3. С. 28-34.
6. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 20Л, 45, 55 и 5ХНВ. Лыгденов Б.Д.,

Гармаева И.А., Попова Н.А., Козлов Э.В., Гурьев А.М., Иванов С.Г. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9. № 4-2. С. 681-689.

7. Изменение фазового состава и механизм формирования структуры переходной зоны при термоциклическом борировании феррито-перлитной стали. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Жданов А.Н., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Известия высших учебных заведений. Физика. 2001. № 2. С. 58.
8. Изменение фазового состава и механизм формирования структуры переходной зоны при термоциклическом карбоборировании феррито-перлитной стали. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Крымских А.И., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Известия высших учебных заведений. Физика. 2000. Т. 43. № 11. С. 60.

УДК 621.785.5

Т.Г. Иванова

БОРОСИЛИЦИРОВАНИЕ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ



Татьяна Геннадьевна Иванова, аспирант
ФГОУ ВПО «Алтайский Государственный Технический Университет им. И.И. Ползунова»
Россия, г. Барнаул E-mail: tatiana-8989@mail.ru

Аннотация:

В работе обсуждаются результаты эксперимента по одновременному насыщению стали 45 бором и кремнием и влияние технологических параметров процесса насыщения и состава насыщающей смеси на эксплуатационные свойства полученных покрытий в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, упрочнение, борирование, силицирование.

T.G.Ivanova

BOROSILITSIROVANIYE – THE PERSPECTIVE WAY HARDENINGS OF PRODUCTS FROM THE IRON-CARBON OF ALLOYS

Tatyana G. Ivanova, e-mail: tatiana-8989@mail.ru,
I.I.Polzunov Altai State Technical University, Russia

Abstract

In work are discussed results of experiment on simultaneous saturation of steel 45 by borons and silicon and influence of technological parameters of process of saturation and structure of a sating mix on operational properties of the received coverings in real service conditions.

Key words: chemical heat treatment, hardening, borating, siliconizing.

Современной промышленности требуются материалы, сочетающие высокие эксплуатационные свойства (износостойкость, жаро- и коррозионная стойкость и т.д.) и минимальную стоимость. В наибольшей степени этим требованиям отвечают углеродистые стали в сочетании с нанесенными на них покрытиями. Одним из перспективных методов нанесения по-

крытий является химико-термическая обработка (ХТО), позволяющая сочетать термическую обработку и нанесение покрытий, при этом получая покрытия, которые другими способами получить не представляется возможным (азотирование, борирование, силицирование и т.п.), либо экономически не выгодно. Наиболее перспективными с точки зрения оптимального сочетания износостойкости и коррозионной стойкости являются боридные покрытия, полученные путем поверхностного легирования железоуглеродистых сплавов бором, однако они обладают и существенными недостатками – высокой хрупкостью и недостаточной коррозионной стойкостью в растворах кислородсодержащих кислот, особенно в азотной кислоте и ее растворах. Силицидные покрытия, полученные насыщением сталей кремнием являются более предпочтительными с точки зрения оптимального сочетания износо- и коррозионной стойкости, но получение таких беспористых покрытий с высоким содержанием кремния затруднительно. В случае многокомпонентного насыщения сталей несколькими элементами возможно получение таких покрытий, в которых нивелируются недостатки соответствующих однокомпонентных покрытий и при этом усиливаются их положительные свойства. Так, при насыщении бором и кремнием возможно получение беспористых покрытий, имеющих высокое содержание кремния, имеющих повышенные износостойкость и пластичность благодаря высокому содержанию бора [1].

Следует отметить, что как правило, многокомпонентное насыщение несколькими элементами ведут последовательно, т.е. сначала насыщая одним элементом, затем другим и т.д., так как одновременные процессы насыщения несколькими элементами изучены недостаточно, что затрудняет иметь стабильный результат. Однако, одновременные процессы получения диффузионных покрытий представляют большой интерес в силу того, что позволяют значительно экономить трудовые (в 1,5-3 раза) и энергетические (до 50 раз) затраты.

Так, предварительные результаты экспериментов по одновременному насыщению бором и кремнием – боросилицированию [2] показали высокие качества боросилидных покрытий – при одновременном боросилировании стали 45 при темепературе 950 °С в течении 3 ч были получены диффузионные слои толщиной от 120 до 140 мкм. Однако, добиться однородности эксплуатационных свойств в одной партии изделий не удалось: повышение ресурса работы комплекта ножей из стали 45 в количестве 5 штук для измельчения полипропиленовых корпусов аккумуляторных батарей составило от 4,5 до 8 раз на один нож в партии.

Режим работы ножей для измельчения корпусов аккумуляторных батарей следующий:

– наличие раствора серной кислоты, содержащейся в батарее;

– наличие абразивных частиц, представляющих собой активную пасту, содержащуюся в пластинах и выпадающую в осадок в процессе эксплуатации батареи;
– высокие усилия, возникающие в процессе резания корпусов аккумуляторных батарей.

Режим насыщения был следующим: температура насыщения – 950 °С, время насыщения – 3 ч, в качестве насыщающей среды использовали порошковую смесь из 15% ферросилиция ФС-75 и борирующей среды на основе карбида бора, насыщение вели в сварном жаростойком контейнере [3]. После насыщения контейнер с ножами извлекали из печи и остужали на воздухе, после чего ножи извлекали и проводили стандартную для стали 45 закалку в сочетании с низким отпуском при 200 °С для снятия закалочных напряжений. Упрочненные таким образом ножи были переданы на испытания. Стойкость упрочненных ножей из стали 45 в комплекте, состоящем из 5 штук работающих одновременно, по сравнению со стандартными ножами из стали 65Г распределилась следующим образом: 2 ножа показали кратность ресурса до полного износа, равную 4,5; один нож – 8; один нож – 6,3; и один нож – 5. Таким образом, средняя кратность ресурса работы ножей для измельчения полипропиленовых корпусов аккумуляторных батарей составила 5,66 (45,28 т измельченных корпусов против 8 т в случае использования традиционно применявшихся ножей), что свидетельствует о перспективности данного способа упрочнения. Экономический эффект от внедрения упрочненных по предлагаемой технологии ножей по оценкам предприятия-испытателя составит порядка 18 тыс. руб. на комплект.

Для улучшения результата и получения равномерного ресурса необходимо провести оптимизацию технологических параметров процесса насыщения и состава насыщающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисенок, Г. В. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник [текст] / Борисенок Г. В., Васильев Л. А., Ворошнин Л. Г., Горбунов Н. С., Дубинин Г. Н. и др. // М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Кайдаш, Н. Г. Структура и свойства боридосилицидных покрытий на железе и стали [текст]/ Н. Г. Кайдаш, Л. Н. Четверикова // Вісник Черкаського національного університету. 2007. Випуск 114 Серія „Фізико-математичні науки”. С. 89 – 115.
3. Гурьев, А. М. Физические основы химико-термоциклической обработки сталей [текст]/ А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, Н. А. Попова, Э. В. Козлов // Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – 250 с.

УДК 519.711.3

Д.Ю. Кабаков, С.Е. Самохвалов

СОПРЯЖЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СЖИМАЕМОЙ СРЕДЫ НА УСТАНОВКЕ КОВШ-ПЕЧЬ



Даниил Юрьевич Кабаков, аспирант
Днепродзержинский государственный технический университет
Украина, г. Днепродзержинск
Тел: +380933524321, E-mail: megafab@i.ua



Сергей Евгеньевич Самохвалов, д.т.н., профессор
Днепродзержинский государственный технический университет
Украина, г. Днепродзержинск
E-mail: serg_samokhval@ukr.net

Аннотация

В статье представлена математическая модель гидродинамики и теплопереноса расплава стали на установке ковш-печь во время продувания его инертным газом и дугового подогрева. Модель реализована в пакете программ на языке С++. Приведена визуализация полученных результатов.

Ключевые слова: газожидкостная среда, гидродинамика, теплоперенос, математическое моделирование, дуговой нагрев.

D.U. Kabakov, S.E. Samokhvalov

CONJUGATE PROCESSES OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF THE GAS-LIQUID CONTINUUM IN A LADLE FURNACE.

Danyyl U. Kabakov[1], e-mail: megafab@i.ua
Dr. prof. Sergiy E. Samokhvalov[1], e-mail: serg_samokhval@ukr.net
[1]Dneprodzerzhinsky State Technical University, Ukraine

Abstract

We present a mathematical model of hydrodynamics and heat transfer of the melted steel in a ladle furnace while it is blowing with inertial gas and arc heating. Model was implemented in computer programs on C++ language. Given the visualization of obtained results.

Key words: gas-liquid continuum, hydrodynamics, heat transfer, mathematical modeling, arc heating.

В наше время при изготовлении стали значительное место при получении высококачественного металла отводится его обработке на установке ковш-печь. В основе процесса рафинирования и доводки расплава стали на установке ковш-печь лежит процесс перемешивания путем продувки металла инертными газами и дуговой подогрев. Данный процесс обеспечивает не только получение металла заданного химического состава и температуры, но и снижение количества неметаллических включений в результате удаления серы и кислорода.

Из-за высокой температуры и агрессивности расплава, а также из-за больших затрат ресурсов при физическом моделировании появляются все основания для привлечения математического моделирования.

Математическая модель теплообмена и гидродинамики в газожидкостной среде типа расплав-газ построена в рамках концепции взаимодействующих и взаимопроникающих континуумов по методике, описанной в [1]. В данная статье представлена модификация представленной в [2 – 4] модели, которая учитывает сжимаемость моделируемой среды, а также дуговой подогрев, осуществляемый на установке.

Динамика газожидкостной среды описывается уравнением Навье-Стокса для несоленоидального движения среды:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = R\left(\vec{v}, \alpha\right) - \vec{\nabla}\tilde{p}\,, \tag{1}$$

дополненного уравнением, следующим из уравнения непрерывности:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \Phi\left(\vec{v}, \alpha\right), \tag{2}$$

уравнением переноса газовой фазы:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot \left[D_e \vec{\nabla} \alpha \right] + \Phi(\vec{v}, \alpha) \qquad (3)$$

и уравнением теплопереноса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{v}\vec{\nabla} T + \vec{\nabla} \cdot \left[a_e \left(1 - \tfrac{3}{2}\alpha\right) \vec{\nabla} T \right] / (1-\alpha) + \psi_T , \qquad (4)$$

где $\vec{v}$ — барицентрическая скорость газожидкостной среды, α — коэффициент объемного содержания газа, $\tilde{p}$ — динамическая составляющая давления, поделенная на плотность металла ρ_0, T – температура среды, t — время, a_e — коэффициент эффективной температуропроводности, D_e — коэффициент эффективной турбулентной диффузии газовой фазы, ψ_T — тепло, поступающее от источника в единицу времени.

Введенные для удобства функции $R(\vec{v}, \alpha)$ и $\Phi(\vec{v}, \alpha)$ в принятом нами вакуумном приближении (отношение плотности газа к плотности металла стремится к нулю) имеют следующий вид:

$$R(\vec{v}, \alpha) = -(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v} + \vec{\nabla}(\nu_e \vec{\nabla} \cdot \vec{v}) + \alpha \vec{g} , \qquad (5)$$

$$\Phi(\vec{v}, \alpha) = \psi_\alpha - \frac{\alpha \rho_0}{\gamma p} \vec{g} \cdot (\vec{v} + \vec{w}) - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{w}) . \qquad (6)$$

Здесь ν_e — эффективный коэффициент кинематической вязкости, $\vec{g}$ — ускорение свободного падения, ψ_α — объемный источник газовой фазы, $\vec{w}$ — диффузионная скорость газовой фазы, γ — показатель адиабаты, p — давление.

Упомянутые выше уравнения являются следствиями законов сохранения, а именно: (1) — импульса, (3) — массы, (4) — энергии. Уравнение (2) служит для согласования полей скоростей и давления, и называется уравнением непрерывности.

В (5) первое слагаемое отвечает за конвективный перенос импульса, второе — за диффузионный (проявление вязких направлений), третье — архимедова сила. Аналогично в (3) и (4) первые слагаемые — конвективный перенос соответственно газовой фазы и тепла, а вторые – диффузионный. Второе слагаемое (6) учитывает увеличение занимаемого объема газом при его всплывании (давление слоев металла на газ на дне и возле свободной поверхности

значительно разнится). Последнее слагаемое в (6) — перенос газа относительно среды.

Для решения системы уравнений (1) – (4) необходимо воспользоваться модифицированным методом расщепления по физическим факторам для сжимаемых сред, который предложен в [1]. Он заключается в следующем:

I этап

$$\tilde{\vec{v}} = \vec{v}^{\,n} + \tau R\left(\vec{v}^{\,n}, \alpha^n\right), \tag{7}$$

II этап

$$\Delta\,\tilde{p}^{\,n+1,k+1} = \left[\vec{\nabla}\cdot\tilde{\vec{v}} - \Phi\left(\vec{v}^{\,n+1,k}, \alpha^{n+1,k}\right)\right]\Big/\tau\,, \tag{8}$$

$$\alpha^{n+1,k+1} = \alpha^n + \tau\left[-\vec{\nabla}\cdot\left(\alpha^{n+1,k}\vec{v}^{\,n+1,k}\right) + \vec{\nabla}\cdot\left(D_e\vec{\nabla}\,\alpha^{n+1,k}\right) + \Phi\left(\vec{v}^{\,n+1,k}, \alpha^{n+1,k}\right)\right], \tag{9}$$

$$\vec{v}^{\,n+1,k+1} = \tilde{\vec{v}} - \tau\vec{\nabla}\,\tilde{p}^{\,n+1,k+1}, \tag{10}$$

III этап

$$T^{n+1} = T^n + \tau\cdot\left\{-\vec{v}^{\,n+1}\vec{\nabla}T^n + \vec{\nabla}\cdot\left[a_e\left(1-\tfrac{3}{2}\alpha^{n+1}\right)\vec{\nabla}T^n\right]/\left(1-\alpha^{n+1}\right) + \psi_T\right\}, \tag{11}$$

где τ — шаг по времени, первый верхний индекс — номер временного слоя, второй верхний индекс — номер итерации.

На первом этапе находится поле промежуточных скоростей $\tilde{\vec{v}}$, без учета давления. На втором этапе при помощи неявной схемы методом итераций находятся поля давления, истинные скорости среды и распределение газовой фазы в следующий момент времени. На третьем этапе с учетом найденных скоростей и распределения газа по явной разностной схеме находим поле температур среды. Уравнение (8) получено благодаря подстановке (7) в (1) и применению оператора набла, после чего учтено (2). Оно является уравнением Пуассона и для его решения оно было заменено соответствующим эволюционным аналогом:

$$p^{n+1,k+1} = p^{n+1,k} + \omega\cdot\left\{\Delta\,\tilde{p}^{\,n+1,k} - \left[\vec{\nabla}\cdot\tilde{\vec{v}} - \Phi\left(\vec{v}^{\,n+1,k}, \alpha^{n+1,k}\right)\right]\Big/\tau\right\}, \tag{12}$$

где ω — эволюционный параметр, который обеспечивает сходимость эволюционного процесса.

За расчетную область берем усеченный конус. Учитывая трехмерную конфигурацию граничных условий, задачу необходимо решать в трехмерной постановке. Конечно-разностные аналоги уравнений (7) – (11) были расписаны на трехмерной шахматной сетке в цилиндрических координатах (r, ϕ, z),

которая окаймлена слоем заграничных ячеек. Скалярные величины (содержание газа, температура, давление) задаются в центрах ячеек, а векторные (скорость) — на гранях.

Граничные условия для скоростей. Для параллельных составляющих скоростей выставляем условие частичного прилипания на твердых поверхностях и условие свободного скольжения на оси симметрии. На свободной поверхности — условие свободного протекания.

Граничные условия для коэффициента содержания газа. На твердых поверхностях и оси симметрии примем условие непротекания, а на свободной поверхности — условие свободного протекания.

Граничные условия для теплообмена. На стенках, свободной поверхности и днище задаются условия эффективной конвективной теплоотдачи с коэффициентами теплоотдачи, которые линейно зависят от температуры (т.е. разные на стенках, днище и свободной поверхности).

Необходимо также отметить, что при расстановке граничных условий важно обеспечить условие сопряжения всех характеристик среды при $\phi = 0°$ и $\phi = 360°$. Для этого были созданы дополнительные ячейки в начале и в конце слоев по углу с номерами 0 и MJ*+1*, куда «транслируются» все величины соответственно с MJ-го и 1-го слоев, где MJ — количество ячеек по углу.

Подача газа через фурмы проводилась путем введения в местах их расположения источника газовой фазы объемной плотности:

$$\psi_\alpha = \frac{q}{V_k}, \tag{13}$$

где q — расход инертного газа через фурму в единицу времени, а V_k — объем зоны формирования режима барботажа (в расчетах считался равным объему расчетной ячейки).

Дуговой подогрев на установке ковш-печь осуществляется при помощи расположенных над расплавом трех симметрично расположенных электродов переменного тока. В модели учет нагрева реализован благодаря введению в местах расположения электродов источников тепла объемной плотности:

$$\psi_T = \frac{P}{3C_0\rho_0 V_k}, \tag{14}$$

где P — суммарная мощность источника, C_0 — теплоемкость металла.

На практике нередко используют ковши с усилением бойной части. Принцип учета ее наличия в ковше описан в [3].

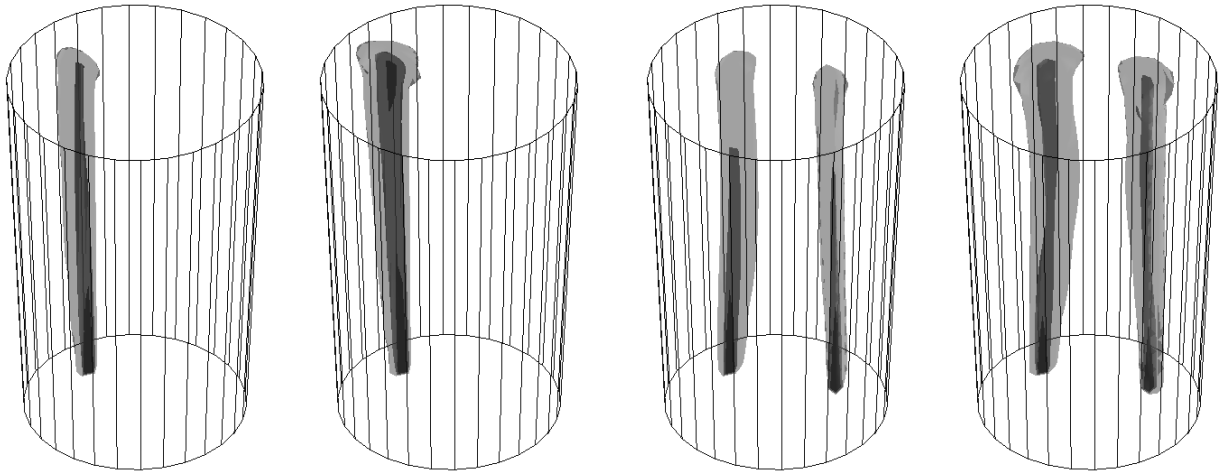
Поданная модель была реализована в пакете программ на языке C++. В пакет входит программа для проведения расчетов и программа для визуализации и анализа полученных результатов при расчетах.

Для демонстрации работы модели в этой статье выбран ковш УКП-60 (ковшовая ванна объемом 60 тонн). Основные параметры ковша приведены в [5].

Были проведены расчеты для расплава стали марки 85Г с начальной температурой 1550 °C при дуговом подогреве 3-мя электродами переменного тока с суммарной мощностью 7.7 мВт с коэффициентом поглощения 0.657.

В расчетах рассмотрены 3 варианта: без продувки, продувка через одну фурму и продувка через 2 несимметрично-расположенные фурмы. Фурмы находятся на расстоянии 0.6 м от оси симметрии, интенсивность подачи газа через каждую фурму — 25 л/мин.

Все последующие результаты взяты на 100-й секунде после начала продувки и подогрева.

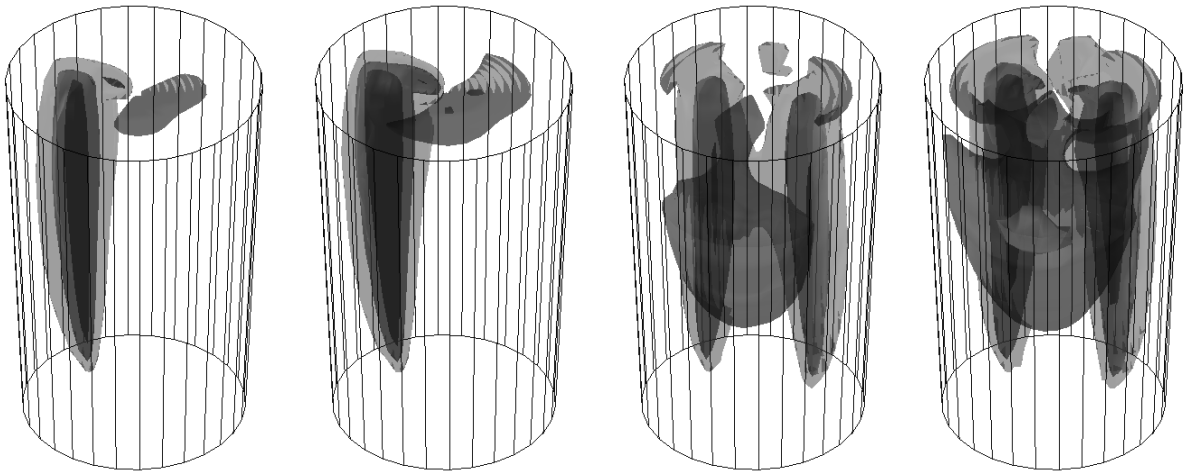


а) б) в) г)

Рис. 1. Изоповерхности полей распределения газа в ковше.
Уровни от светлого к темному: 1%, 5 %, 10%.

На рис. 1 можно увидеть изоповерхности полей распределения газа в ковше в случаях продувки через одну и две фурмы. Для подобной визуализации в разработанных программах реализован метод марширующих кубов. Тут и далее случаи а) и в) относятся к расчетам без учета сжимаемости среды, б) и г) — с ее учетом. Главным проявлением сжимаемости среды является увеличение объема газа при его всплывании, что соответствует физической реаль-

ности: чем ближе газ к свободной поверхности, тем меньше давления на него оказывают слои металла, что находятся над ним и, соответственно, его плотность уменьшается, а объем увеличивается.



а) б) в) г)

Рис. 2. Изоповерхности барицентрических скоростей в ковше.
Уровни от светлого к темному: 0.15 м/с, 0.25 м/с, 0.35 м/с.

На рис. 2 представлены поля барицентрических скоростей среды в упомянутых выше случаях. Как можно заметить, в сжимаемом случае более распространенный по объему ковша газ приводит к более высоким скоростям. В таблице 1 приведены средние скорости в ковше, которые подтверждают раннее сказанное.

Таблица 1

Средние скорости в ковше

а)	0.070 м/с
б)	0.082 м/с
в)	0.112 м/с
г)	0.134 м/с

Приходим к выводу, что даже при столь невысокой интенсивности продувки учет сжимаемости среды заметно отражается на результатах. Поэтому далее будем рассматривать только сжимаемый случай.

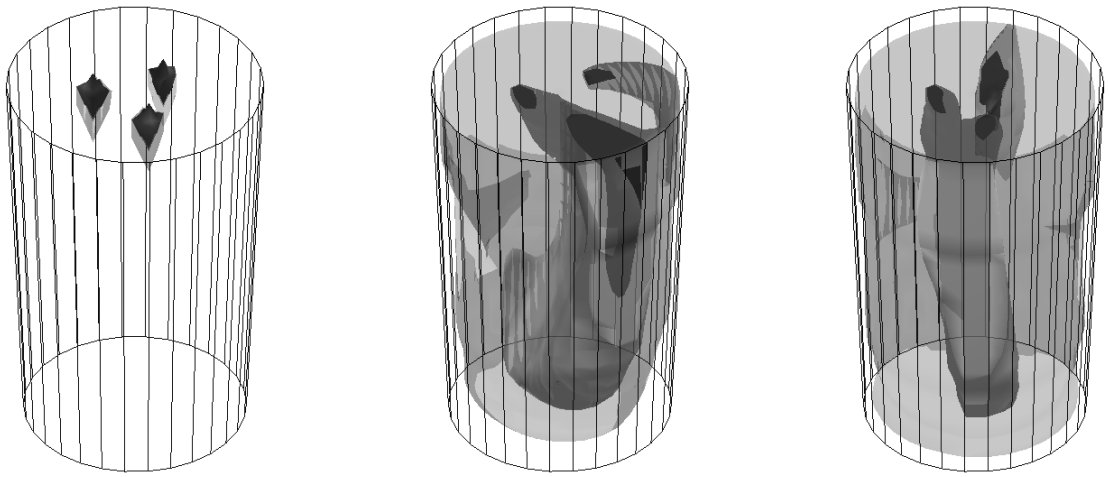
Рис. 3 показывает поля температур при указанных режимах продувки. Во всех трех рассматриваемых случаях средняя температура приблизительно равна, что свидетельствует о соблюдении закона сохранения энергии, т.к. источники (электроды переменного тока) и начальные условия во всех трех случаях одинаковы. Стоки (теплообмен с окружающей средой), несмотря на их зависимость от скорости подвода горячего металла к стенкам за столь небольшой промежу-

Таблица 2

Средние температуры в ковше

Без фурм	1553.690 °C
1 фурма	1552.876 °C
2 фурмы	1552.412 °C

ток времени играют на порядок менее значительную роль в ходе исследуемого процесса. Но можно отметить, что металл нагревается тем медленнее, чем более интенсивно он перемешивается. Также можно сделать заключение о ключевой роли конвективной составляющей переноса, т.к. в случае без продувки все тепло от электродов сосредоточено в небольшой области около них, а в случае продувки через 2 фурмы (когда потоки металла интенсивней) температура более усреднена по объему ковша, чем в случае продувки через 1 фурму. Об этом свидетельствует наличие относительно больших зон с температурой выше 1560 °С и значительно меньший размер зоны с температурой от 1550 °С (особенно ближе к днищу) на второй иллюстрации рисунка 3 по сравнению с третьей.



Без фурм 1 фурма 2 фурмы

Рис. 3. Изоповерхности температур в ковше.
Уровни от светлого к темному: 1550 °С, 1555 °С, 1560 °С.

ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель сопряженных процессов гидродинамики и теплообмена на установке ковш-печь при дуговом подогреве с учетом сжимаемости среды. Главным усовершенствованием модели является возможность учета сжимаемости среды и, как показано в статье, этот аспект заметно отражается на результатах.
2. Модель реализована в пакете программ, с помощью которого были проведены расчеты и визуализированы представленные в статье результаты.

3. Анализ полученных результатов подтверждает качественную адекватность модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самохвалов С.Є. Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – 174 с.
2. Математичне моделювання спряжених процесів гідродинаміки та теплопереносу у ковші при різних режимах продування / Д.Ю. Кабаков // Вісник СевНТУ. Серія Механіка, енергетика, екологія. – №133. – 2012. – с. 118-121.
3. Спряжені процеси гідродинаміки та теплопереносу у ковші під час наповнення / Д. Ю. Кабаков, С.Є. Самохвалов // Системні технології. – № 2 (79). – 2012.– с. 146-151. — http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/syte/2012_2/19.pdf
4. Математична модель спряжених процесів гідродинаміки та теплообміну у сталерозливному ковші з посиленою бійною частиною / Д. Ю. Кабаков, В.П. Піптюк, І.М. Логозинський, О.Г. Чичерін // Вісник ХНТУ. – № 2 (45). – 2012.– с. 160-165.
5. Основные данные для численных исследований гидродинамики ванны на установках ковш-печь переменного тока разной мощности / Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Логозинский И.Н. и др. // Сб. науч. тр. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии», 2007. – Выпуск 14. – с.145-153. — http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/Ftpp/2007-14/14-07/14-145.pdf

УДК 621.735:669.715

В.В. Почетуха, В.В. Ерастов, В.В. Почетуха

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА



Василий Витальевич Почетуха, старший преподаватель Сибирский государственный индустриальный университет
ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, 654000, Россия.
Тел.(3843)460600, v.pochetuha@mail.ru.



Виктор Васильевич Ерастов, д.т.н., профессор Сибирский государственный индустриальный университет
ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, 654000, Россия.
Тел.(3843)460600, v.pochetuha@mail.ru.



Василий Васильевич Почетуха, аспирант
Сибирский государственный индустриальный университет
ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, 654000, Россия.
Тел.(3843)460600, v.pochetuha@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы изучения влияния горячей пластической деформации на пластичность и сопротивление деформации эвтектических и заэвтектических силуминов. Результаты показали, что значительный положительный эффект на данные свойства силуминов оказывает модифицирование и пластическая деформация.

Ключевые слова: деформация, пластичность, сопротивление деформации, эвтектические и заэвтектические силумины, алюминиево-кремнистые сплавы, модифицирование.

V.V.Pochetuha, V.V. Erastov,V.V. Pochetuha

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ZAEUTECTIC SILUMINS AT TEMPERATURES OF HOT DEFORMATION DEPENDING ON MODIFYING EFFECT

Vasiliy Vitalievich Pochetuha[1];
Viktor Vasilievich Erastov[1];
Vasiliy Vasilievich Pochetuha[1].
[1]Siberian state industrial university, Russia.

Abstract

In work the questions of the influence study of hot plastic deformation on plasticity and resistance to deformation eutectic and zaeutectic silumins are considered. The results have shown that a significant positive effect on the properties of silumins has modifying and plastic deformation.

Key words: modifying, deformation, plasticity, resistance to deformation, eutectic and zaeutectic silumins, aluminium-siliceous alloys.

Области применения силуминов эвтектического и заэвтектического составов определены достаточно широко. Они используются и как литейные сплавы, так и в последнее время как деформируемые. Деформационные способы обработки данных сплавов раскрывают большие возможности их использования особенно в машиностроении[1].

Исходя из этого, очень важно знать реологические свойства силуминов эвтектического и заэвтектического составов при температурах горячей деформации в зависимости от модифицирующего эффекта.

Известно, что повышенное содержание кремния у эвтектических и особенно у заэвтектических сплавов резко снижает их пластичность и повышает сопротивление деформированию. Поэтому с целью увеличения пластических свойств у этих сплавов проводят модифицирование и дополнительно пластическое деформирование[2].

Это доказывается проведенными исследованиями на кручение силуминов при температурах горячего деформирования в литом и кованом состоянии с процентным содержанием 20% Si в зависимости от способа приготовления. Для сравнительной оценки свойств испытывались двойные, двойные наводороженные, двойные наводороженные закаленные, двойные модифицированные 0,1 % CuP сплавы.

Пластичность данных сплавов оценивалась критерием (показателем) пластичности М.А.Зайкова - В.Н. Перетятько [3].

$$\pi_0 = \left[1-\left(1-\varepsilon_{mp}\right)^{\frac{1}{\beta\cdot n}}\right]\cdot 100\%, \qquad (1)$$

где ε_{mp} – степень деформации до разрушения (появление первой трещины):

n – показатель схемы напряженного состояния;

β – коэффициент Лодэ.

Коэффициент Лодэ при кручении равен 1,15.

Показатель схемы напряженного состояния при кручении равен 1.

Степень деформации до разрушения (появление первой трещины) определена экспериментально с использованием формулы В.Г. Осипова.

$$\varepsilon_{mp} = 1-\frac{1}{1+\gamma/2}, \qquad (2)$$

где $$\gamma = \frac{\pi \cdot d_0}{l_0} \cdot z_n, \qquad (3)$$

γ – относительный угол сдвига;

d_0, l_0 – размеры образца, мм;

z_n – количество оборотов до разрушения.

Одним из основных показателей, которые определяют энергосиловые затраты в процессах ОМД, является сопротивление деформации. Временное сопротивление деформации при кручении (в мегапаскалях) определяется по известной зависимости [4]:

$$\sigma_{se} = \frac{12 \cdot \sqrt{3} \cdot M_{кр}}{\pi \cdot d_0^3} = 6{,}6 \frac{M_{кр}}{d_0^3}, \qquad (4)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент при кручении.

В результате проведенных испытаний данных силуминов в литом и кованном состояниях определены значения температур, соответствующие максимальным значениям пластичности, которые представлены в таблице 1 и 2 (при скорости скручивания 100 об/мин). Данная скорость испытания соответствует скоростным условиям прессования и объемной штамповке на гидравлических прессах.

Таблица 1

Температура максимальной пластичности исследованных алюминиево-кремнистых сплавов

Содержание кремния, % и способ приготовления.	20	20 н	20 н+з	20 0,1CuP
Температура максимальной пластичности в литом состоянии, Град.С.	550	550	550	550
Температура максимальной пластичности в кованом состоянии, Град.С.	500	500	500	500

Таблица 2

Предельная степень деформации и пластичность силуминов в зависимости от процентного содержания в них кремния

Содержание кремния, % и способ приготовления.	20	20 н	20 н+з	20 0,1CuP
Предельная степень деформации в литом /кованом состоянии, %	51,6 / 63,5	52,2 / 62,5	52,3 / 67,5	52.2 / 70
Показатель пластичности в литом /кованом состоянии, %	46,79 / 58,34	47,39 / 57,36	47,4 / 62,3	47.4 / 64,9

Полученные результаты исследований и проведенный микроструктурный анализ данных силуминов показывают, что деформация, наводороживание, закалка, модифицирование приводит к измельчению всех структурных составляющих, особенно кремнистой фазы. При этом также проявляется волокнистость структуры, причем в направлении деформации вытягиваются и участки кремнистой фазы.

В связи со структурными изменениями данных сплавов произошли изменения их пластических свойств. Уменьшение в результате пластической деформации количества и размера выделений кремнистой фазы в заэвтектических состояниях кованых сплавов по сравнению с литыми в зависимости от способа приготовления приводит к снижению сопротивления деформации (особенно в кованном на 11-6%, табл. 3) и к существенному приросту пластичности: для двойного сплава в 2,14 раза, наводороженного в 1,75 раза, наводороженного и закаленного в 1,8 раза, модифицированного 0,1 % CuP в 2,1 раза. Данные исследования показывают, что проведенная предварительная обработка по улучшению структуры и свойств исходных силуминов позволяет незначительно повысить их пластические свойства, как в литом, так и в кованом состояниях. В связи с этим уменьшается разница их пластических свойств в литом и кованом состояниях. Лучший результат в этом направлении дает модифицирование данных сплавов фосфористой медью.

Для выявления влияния скорости деформации на пластические свойства и сопротивление деформации данных сплавов, как уже указывалось, проводились испытания при различных скоростях скручивания: 8, 100, 420 об/мин (табл. 3). Из анализа проведенных исследований можно заключить следующее. Для сплава, содержащего 20% кремния в литом состоянии, с увеличением скорости скручивания с 8 до 420 об/мин пластичность падает в 2 раза, сопротивление деформации возрастает в 1,77 раза. В кованом состоянии для этих же условий пластичность падает в 1,3-1,4 раза, сопротивление деформации возрастает в 1,86 раза. Для двойного наводороженного сплава в литом состоянии при таких же скоростях пластичность уменьшается в 1,32 раза, сопротивление деформации возрастает в 1,64 раза., а в кованном в уменьшается 1,31 раза, сопротивление деформации возрастает в 1,4 раза. Для двойного наводороженного закаленного сплава, содержащего 20% кремния, в литом состоянии при этих же условиях наблюдается снижение пластичности в 1,31 раза, сопротивление деформации возрастает в 1,55 раза., а в кованном - в 1,35 раза, сопротивление деформации возрастает в 1,67 раза.. Для двойного модифицированного 0,1 % CuP сплава в литом состоянии при этих же условиях наблюдается снижение пластичности в 1,15 раза, сопротивление деформации возрастает в 1,51 раза., а в кованном – в 1,05 раза, сопротивление деформации возрастает в 1,72 раза.

Таблица 3

Влияние температуры и скорости скручивания на сопротивление деформации силуминов

Содержание кремния в сплаве, % и способ приготовления.	Скорость скручивания, об/мин	Сопротивление деформации, МПа					
		Температура деформирования, °С.					
		350	400	450	500	525	550
Литой 20	8	77,15	58,29	45,39	34,6	21,19	19,07
Литой 20 н	8	78,7	60,6	50,31	38,42	25,61	23,4
Литой 20 н+з	8	77,1	63,43	52,5	41,56	29,14	27,89
Литой 20 0,1 CuP	8	80,71	62,9	49,21	40,15	26,25	24,54
Кованый 20	8	52,12	41,99	34,2	24,48	19,74	17,07
Кованый 20 н	8	66,32	50,24	32,48	27,14	23,9	21,87
Кованый 20 н+з	8	63,43	45,15	33,1	26,22	23,58	19,69
Кованый 20 0,1 Cu.P	8	67,80	54,28	35,85	25,23	18,5	17,5
Литой 20	100	92,15	67,38	50,24	41,05	35,17	28,5
Литой 20навод.	100	95,4	79,1	58,8	43,22	38,35	30,14
Литой 20 н+з	100	105,99	84,92	63,12	45,61	40,22	31,70
Литой 20 0,1 CuP	100	95,8	71,6	53,37	44,3	40,3	30,54
Кованый 20	100	69,01	51,64	44	32,51	30,72	29,14
Кованый 20 н	100	66,96	51,35	41,77	30,79	28,67	25,61
Кованый 20 н+з	100	66,15	51,1	41,1	30,77	27,04	25
Кованый 20 0,1 CuP	100	70,97	58,91	37,2	28,74	26,12	21,01
Литой 20	420	117,59	85,51	63,89	51,26	42,3	34,5
Литой 20 н	420	120,82	94	68,3	56,3	51,5	38,42
Литой 20 н+з	420	124,98	96,99	74,72	59,1	56,87	43,32
Литой 20 0,1 CuP	420	124,67	89,67	64,52	53,1	50,31	37,1
Кованый 20	420	71,68	66,32	53,25	41,14	33,25	31,7
Кованый 20 н	420	80,28	62,81	49,02	39,62	36,7	30,62
Кованый 20 н+з	420	74,4	59,16	48,97	37,44	34,23	32,81
Кованый 20 0,1 CuP	420	94,05	88,6	56,75	49,5	30,69	30,18

Снижение пластичности и возрастание сопротивления деформации с увеличением скорости скручивания в литом состоянии у этих сплавов объ-

ясняется их повышенной хрупкостью, наличием в структуре первичных выделений кремнистой фазы, которые являются зародышами трещин. В процессе ковки происходит изменение этой фазы, ее измельчение и равномерное распределение по телу заготовки. Значительная негомогенность деформации при высоких скоростях скручивания способствует повышению общего уровня пластичности.

Данные табл. 2 показывают, что для повышения пластичности и степени деформации при штамповке и прессовании рассматриваемых сплавов необходимо проводить их предварительную пластическую деформацию при режимах, определенных пластометрическими испытаниями, соответствующих конкретному технологическому процессу.

Одним из основных показателей, которые определяют энергосиловые затраты в процессах ОМД, является сопротивление деформации. Временное сопротивление деформации при кручении определяется по известной зависимости [4].Результаты исследования влияния температуры и скорости скручивания на сопротивление деформации силуминов приведены в табл.3. Данные результаты исследований позволяют адекватно рассчитывать усилия деформирования данных сплавов для конкретных температурно-скоростных условий, соответствующих определенному способу обработки металлов давлением.

Вывод. Измельчение первичных выделений кремнистой фазы в данных сплавах можно достичь за счет модифицирования литой структуры различными способами, однако лучшего результата в дроблении первичного кремния достигают за счет пластичной деформации или совместного использования двух вышеуказанных способов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Почетуха В.В., Почетуха В.В. О пластичности и сопротивлении деформации литых и деформированных эвтектических и заэвтектических силуминов // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-прак. конференции. / Под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. -С. 614-620.
2. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Металлургия, 1977. – 271 с.
3. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
4. Тарновский И.Я и др. Механические свойства стали при горячей обработке давлением. – Свердловск: Металлургиздат, 1980. – 263 с.

УДК 621.565.952.74: 621.791.72

Р. Ф. Тукаев, А.М. Файрушин, А.В. Сисанбаев, Т.М. Кучуков

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛА «ТРУБА – ТРУБНАЯ РЕШЕТКА» КОЖУХОТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ИЗ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 15Х5М ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ



Рауль Фиделевич Тукаев, аспирант
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа
Тел.: +79613691252, +79129025125,
E-mail: raul.tukaev@gmail.com.



Айрат Миннуллович Файрушин, к.т.н.,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, Уфа
Тел.: (347)243-1112, +79177556131



Альберт Василович Сисанбаев, к.ф.-м.н, старший науч. сотр.
Институт проблем сверхпластичности металлов РАН
Россия, Уфа
Тел.: (347)282-3710, E-mail: sisan-av@yandex.ru.



Тимур Мирзаевич Кучуков, инженер
МЦКП «Недра»
Россия, Уфа
Тел.: +79173463986,
E-mail: kuchukovtimur@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрен вопрос применимости лазерной сварки для решения ряда проблем, связанных с влиянием сварочных напряжений на технологическую прочность сварного шва, при изготовлении узла «труба – трубная решетка» с использованием традиционного способа дуговой сварки. Результаты экспериментов показали, что за счет локальных тепловложений и уменьшения размеров сварочной ванны и зон термического влияния, лазерная сварка позволяет значительно минимизировать влияние на-

пряжений на геометрические параметры трубной решетки, а также избежать появления трещин.

Ключевые слова: лазерная сварка, теплообменник, трубная решетка, технологическая прочность

R.F.Tukaev, A.M.Fajrushin, A.V.Sisanbaev, T.M.Kuchukov

15X5M (15Cr5Mo) SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER TUBE SHEET PRODUCTION MODIFICATION WITH LASER WELDING

Raul F. Tukaev[1], e-mail: raul.tukaev@gmail.com;
Ph.D. Ajrat M. Fajrushin[1], e-mail: tna_ugntu@mail.ru;
Ph.D. Albert V. Sisanbaev[2], e-mail: sisan-av@yandex.ru;
Timur M. Kuchukov, e-mail: kuchukovtimur@gmail.com.
[1]Ufa State Petroleum Technological University, Russia,
[2]Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences, Russia

Abstract

The article is devoted to applicability of laser welding for the solve of a number of the problems arising at production of the "tube – tube sheet" unit with way of arc welding using, connected with influence of residual and welding stresses. The results have shown that due to local heatinvestments and reduction of the sizes of a molten pool and heat–affected zones, laser welding allows to improve production technology of this unit, to minimize influence of stresses on geometrical parameters of tube sheet, to avoid emergence of cracks.

Key words: laser welding, heat exchanger, tube sheet, technological strength.

Одним из наиболее перспективных направлений в современном машиностроении является повышение качества сборки заготовок и деталей машин и аппаратов в процессе их изготовления и снижение трудоемкости технологических процессов.

Изготовление сварного узла «труба – трубная решетка» трубного пучка кожухотрубчатых теплообменных аппаратов наиболее часто производится с применением дуговой сварки.

При развальцовке трубок внутри решетки возникают остаточные напряжения, а при последующей приварке труб к трубной решетке – сварочные, которые в сумме влекут за собой прогиб трубной решетки, значительно осложняющий сборку теплообменных аппаратов.

Определенные трудности возникают в случае, если трубный пучок теплообменного аппарата изготавливается из жаростойкой стали (в данной

научной работе рассматривается жаропрочная низколегированная сталь марки 15Х5М). Для исключения образования холодных трещин процесс сварки требует предварительный и сопутствующий подогрев (для стали 15Х5М температура подогрева составляет от 300 до 350°С) и последующую высокотемпературную термообработку (для стали 15Х5М термообработка производится при температуре от 740 до 760°С).

Для решения проблемы влияния остаточных и сварочных напряжений на сборку, а также для снижения трудоемкости и повышения точности изготовления узла «труба – трубная решетка» предлагается рассмотреть возможность присоединения труб к трубной решетке способом лазерной сварки.

Обладая таким свойством, как высокая концентрация энергии при малом пятне нагрева, лазер позволяет вести процесс сварки с меньшими тепловложениями и, как следствие, меньшими размерами сварочной ванны и зон термического влияния, четко контролируя технологические параметры и глубину проплавления. Данный немаловажный фактор позволяет найти решение проблемы влияния сварочных напряжений на прогиб трубной решетки и уменьшить ее толщину, что позволит добиться уменьшения затрат на изготовление трубного пучка. Также на снижение трудоемкости процесса приваривания труб к трубной решетке влияет высокое качество сварного шва при отсутствии необходимости подогрева и термообработки за один проход. Однако, лазер, как прецизионный инструмент, предъявляет свои требования к подготовке присоединяемых деталей и культуре производства в целом. Локальный нагрев и малый размер пятна требует точного сопряжения свариваемых поверхностей.

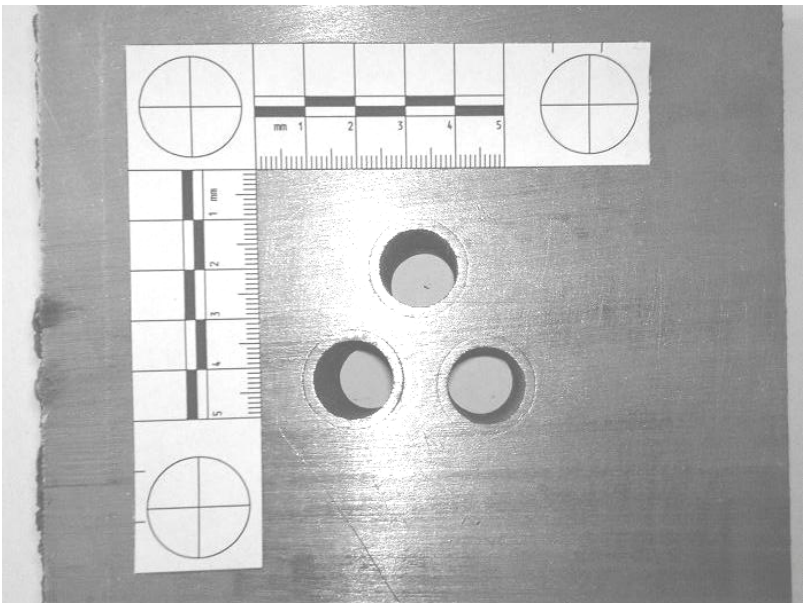


Рис. 1. Заготовка, имитирующая узел «труба – трубная решетка»

Для изучения свойств сварного шва в узле «труба – трубная решетка» и выработки пробной технологии получения сварного узла, выполненном

способом лазерной сварки, была произведена сварка заготовки из стали 15Х5М, имитирующей данный узел. Сварка производилась без присадочного материала на торцевой поверхности заготовки по окружности предварительно развальцованной трубки (глубина проплавления ~ ок. 5 мм), промышленным волоконным лазерным сварочным комплексом на базе ООО СП «Лазертех» г. Санкт-Петербург.

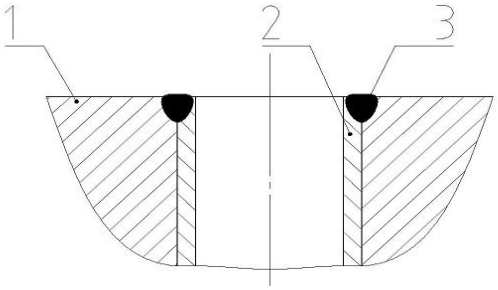
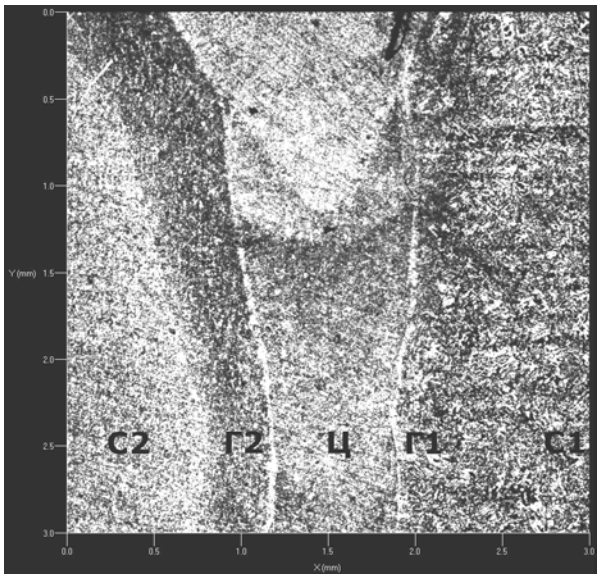
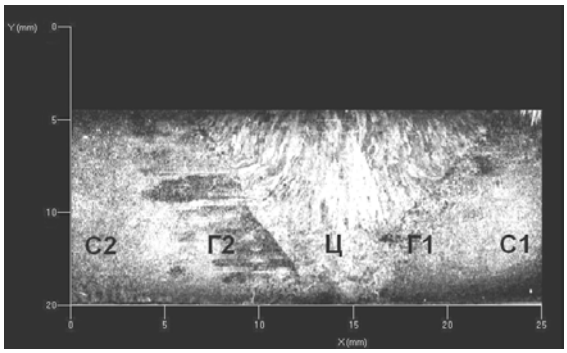


Рис. 2. Расположение сварного шва (разрез)
1 – трубная решетка, 2 – трубка, 3 – сварной шов

Поставленная задача получения образцов сварного соединения с обеспечением сплошности на необходимую глубину была выполнена. Далее заготовка была разрезана механическим способом и полученные образцы поперечного разреза сварного шва были отшлифованы и отполированы для последующего анализа микроструктуры.

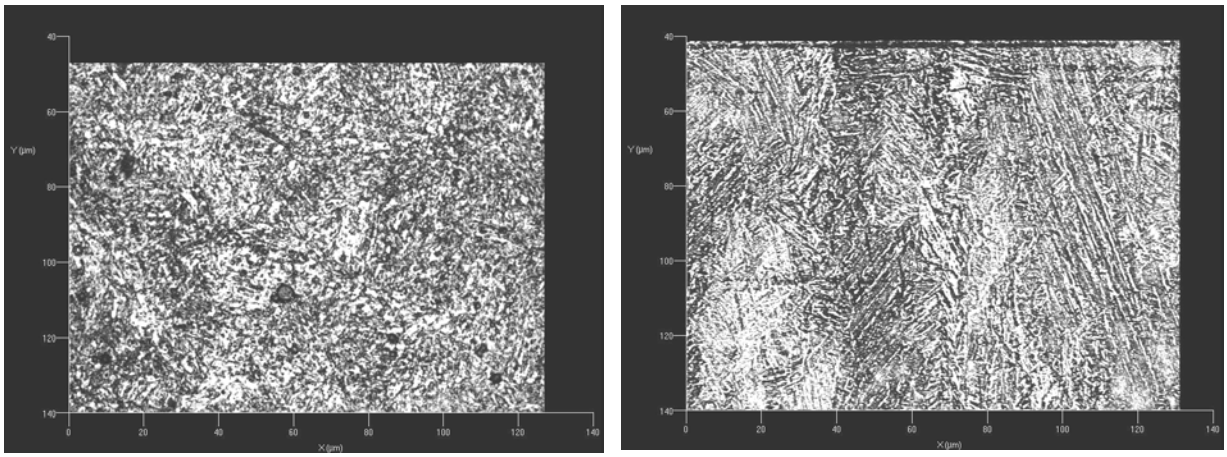


а)



б)

Рис. 3. Макрофотография сварного шва (поперечный разрез)
а – лазерная сварка, б – дуговая сварка по существующей технологии с предварительным подогревом (300 – 350°С) и последующей термообработкой (750°С, 2 часа) С2 – зона металла трубной решетки, Г2 – зона термического влияния между сварным швом и металлом решетки, Ц – зона сварного шва, Г1 – зона термического влияния между сварным швом и металлом трубки, С1 – зона металла трубки



а) б)

Рис. 4. Микроструктура зоны металла сварного шва
а – лазерная сварка, б – дуговая сварка по существующей технологии дуговой сварки с предварительным подогревом (300 – 350°С) и последующей термообработкой (750°С, 2 часа)

Для выявления микроструктуры шва, полученного лазерной сваркой понадобилось применение электрохимического травления (катод – нержавеющая сталь, анод – образец) в 5% растворе азотной кислоты HNO_3 в этиловом спирте в течение времени t ~ 3 мин при напряжении V = 10 В и силе тока I = 0,1 А. Стоит отметить высокое качество металла шва на всем исследуемом участке, ярко выраженный «кинжальный» характер проплавления, обусловленный спецификой лазерной сварки, малый размер зон термического влияния (~ 0,5 мкм) и зон расплавления между ними и металлом шва.

Таблица 1

Данные анализа размера зерна на разрезе сварного шва, полученного лазерной сваркой, мкм

Параметры зерна	Зоны				
	С2	Г2	Ц	Г1	С1
Минимальный	3,4	1,1	1,1	3,3	3,3
Максимальный	32,3	36,8	18,6	47,4	38,1
Среднее значение по занимаемой площади	5,5	2,4	1,9	6,8	6,3

При более детальном рассмотрении структуры наблюдается следующее: мелкозернистая структура шва, полученного лазерной сваркой обладает более высокой дисперсностью, не имеет выраженного направленного характера пластинчатой мартенситной структуры шва, полученного элек-

трической дугой. Зерно не вытянутое и в среднем обладает значительно меньшими размерами.

Таблица 2

Данные замеров микротвердости по Виккерсу (HV) в разных областях сварного шва

Лазерная сварка	Зона	С2	Г2	Ц	Г1	С1
	HV, МПа	1711	3471	3207	3271	1669
Дуговая сварка с подогревом и термообработкой	Зона	С2	Г2	Ц	Г1	С1
	HV, МПа	1573	1703	2076	2043	1708

Микротвердость по Виккерсу измеряли на микроскопе «Axiovert-100A» » (Carl Zeiss, Germany) с приставкой «МНТ-10» локально вдоль центральной линии перпендикулярной вытянутой области сварного шва (см. рис. 3) при скорости нагружения v = 50 г/с, нагрузке P = 100 г и времени выдержки под нагрузкой t = 10 с.

Как следует из результатов замеров микротвердости, применение лазерной сварки не соответствует по данному параметру существующей отработанной технологии и следует необходимость применения последующей термообработки, однако, при более низкой температуре, чем в случае со сваркой дугой.

Естественная экономия, рождаемая при снижении температуры термообработки, высокое качество шва, снижение влияния сварочных напряжений за счет меньшего тепловложения позволяют прогнозировать положительные результаты в деле модернизации технологии получения сварного узла «труба – трубная решетка» из жаропрочной хромомолибденовой стали с использованием лазерной сварки.

На основе полученных результатов, с учетом все большего распространения лазерных технологий в промышленности следует вывод о перспективности использования лазерной сварки в нефтяном машиностроении и необходимости дальнейшего исследования и анализа применяемых способов сварки в сравнении с лазерной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малащенко А.А., Мезенов А.В. Лазерная сварка металлов – М.: Машиностроение, 1984. – 44 с.
2. Бакиев А.В., Халимов А.Г., Зайнуллин Р.С, Афанасенко Е.А. Пути повышения качества и надежности нефтехимического оборудования из хромомолибденовых сталей: Обзорная информация. Сер. ХМ–9. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1987. – 32 с.

3. Халимов А.Г., Бакиев А.В., Зайнуллин Р.С. Работоспособность сварных соединений из стали 15Х5М. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. – 84 с.
4. Талыпов Г.Б. Сварочные деформации и напряжения. Л.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
5. Стеклов О.И. Основы сварочного дела. М.: Высшая школа, 1986. – 224 с.
6. Ибрагимов И.Г., Ямилев М.З., Салмин А.Н. Совершенствование технологии выполнения сварного узла «труба – трубная решетка» кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, изготовленных из мартенситных сталей // Нефтегазовое дело. – 2009. – Т. 7. – №1. – С. 194–197.
7. Григорьянц А.Г., Грезев А.Н., Грезев Н.В. Лазерная сварка сталей больших толщин с применением мощных оптоволоконных CO_2 – лазеров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – №6. – С. 181–189.
8. Бакиев А.В., Халимов А.Г., Зайнуллин Р.С. Исследование свариваемости жаропрочных малоуглеродистых сталей типа 15Х5М // Нефть и газ. – 1978. – №4. – С. 81–84.
9. Ачинович Н.Н., Клыков Н.А. Влияние остаточных напряжений на выносливость сварных соединений стали повышенной прочности // Автоматическая сварка. – 1973. – № 11. – С. 6–8.
10. ГОСТ Р 52857.7–2007 Национальный стандарт РФ. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты.

УДК 004.94

А.В. Хижняк

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ



Александра Владимировна Хижняк, аспирант
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 904-559-5775, E-mail: alexandrakhiznyak@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрен алгоритм визуализации замкнутого пространства, в котором происходит горение, и необходимо отобразить температуру горения в каждой точке этого пространства. Визуализируется алгебраическая модель процесса горения, содержащая геометрическую информацию об объеме замкнутого пространства и функции распределения температуры в каждой точке замкнутого пространства. Данный алгоритм позволяет проследить процесс горения, начинающийся в любой точке замкнутого пространства с необходимой точностью и его распространение до оболочки пространства в любых направлениях.

Ключевые слова:
моделирование, процесс горения, математические и компьютерные модели, визуализация

A.V. Khiznyak

VISUALIZATION OF PROCESS OF COMBUSTION IN SELFCONTAINED SPACE

Alexandra V. Khiznyak, Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Russia, e-mail: alexandrakhiznyak@gmail.com

Abstract

In activity the algorithm of visualization of selfcontained space is reviewed, in which one there is a combustion, and it is necessary to map combustion temperature in each point of this space. The algebraic model of process of combustion keeping the geometrical information on a volume of selfcontained space and cumulative distribution function of temperature in each point of selfcontained space is visualized. The given algorithm allows to observe process of combustion starting in any point of selfcontained space with indispensable accuracy and its distribution up to a shell of space in any directions.

Key words: simulation, process of combustion, mathematical and computer

models, visualization.

Введение

Процесс горения интересовал людей с давних пор. Вначале их внимание было направлено на получение огня, особенно в холодных условиях проживания. Затем, когда огонь выходил из под контроля и возникали пожары, появился интерес к пожарной безопасности и укрощению огня. Технический прогресс – выплавка металлов, появление паровых, бензиновых и ракетных двигателей, широкое их использование заставило людей серьезно задуматься об изучении процесса горения, однако теоретические представления об этом явлении и сопровождающих его процессах начали развиваться в начале прошлого столетия, что привело к созданию теории цепного и теплового взрыва. Классификации процессов горения, описанию их особенностей, изложению теоретических основ этой области науки посвящена обширная литература [1- 8].

Интенсивное развитие вычислительной техники в конце прошлого века дало возможность моделировать процессы возгорания, горения и взрыва, что позволило перейти от экспериментальных изучений этих весьма сложных по своим природным явлениям, быстротечных и опасных для жизни процессов к теоретическим исследованиям.

Визуализация процессов возгорания, горения и взрыва позволяет более качественно оценить эти процессы и сравнить результаты и адекватность экспериментальных и теоретических исследований.

Методы экспериментального исследования процессов горения создавались в неразрывной связи с развитием теории горения. На различных стадиях развития представлений о процессах горения соотношение между теорией и экспериментом менялось, однако всегда при исследованиях ощущался недостаток теоретических и экспериментальных данных реальных процессов.

Необходимо отметить, что эксперименты процессов горения в реальных технических устройствах используют аппаратуру высокой стоимости из-за быстротечности процесса, особенно при взрывах, и необходимости записи большого объема информации: температуры, давления, скорости и направления движения продуктов горения. Размещение средств наблюдения и измерения этих параметров в замкнутом пространстве влияет на процесс горения и приводит к искаженным результатам.

Сложность теоретических исследований процессов горения в замкнутом пространстве заключается в том, что необходимо моделировать эти процессы на нано уровне (мелких по размеру частиц материалов горения и молекул газа). Объемы записи таких моделей для теоретических исследований реальных конструкций весьма большие даже для супер- компьютеров.

Второй проблемой моделирования является геометрическое описание замкнутого пространства и внутренних оболочек реальных изделий, форма которых на нано уровне значительно отличается от простых форм (прямоугольных форм, сфер, цилиндров, конусов и т.п.). Используемые в настоящее время геометрические модели при записи и обработке в компьютере используют трехмерные растровые или векторные методы, что при увеличении размеров и геометрической точности описания объемов приводит к резкому возрастанию объемов записи и увеличению времени преобразованию модели и ее визуализации.

В данной работе предлагается использовать алгебраическую пятимерную модель замкнутого пространства, включающую геометрическую информацию о замкнутом пространстве и функцию распространения температуры процесса горения от внутренней заданной точки до оболочки замкнутого пространства.

Предложен алгоритм визуализации данной алгебраической модели.

Алгебраическая модель процесса горения в замкнутом пространстве

Алгебраической моделью называем модель, представленную алгебраическими степенными уравнениями и неравенствами общего вида с многими переменными в любой степени, представленными в лексографической форме.

Лексографическая форма записи модели представляет собой последовательную запись справа членов алгебраического выражения от нулевого члена в порядке следования переменных с повышением степени при переменных. Это упорядочивает запись модели при разных максимальных числах переменных и степени в общем виде.

Геометрия оболочки замкнутого пространства представлена выражением (1).

$$A_m x^n + A_{m-1} y^n + A_{m-2} z^n + \ldots + A_3 x + A_2 y + A_1 z + A_0 = 0, \qquad (1)$$

где A – числовой коэффициент уравнения, любые положительные и отрицательные числа с любой точностью;

x,y,z - переменные ортогональной системы координат, любые положительные и отрицательные числа с любой точностью;

m – максимальный номер числового коэффициента уравнения, целые положительные числа;

n – максимальный номер степени при переменных, целые и дробные положительные числа.

Алгебраическое уравнение (1) содержит трехмерную информацию о форме оболочки замкнутого пространства, о местоположении оболочки в системе координат относительно начала системы координат и об ориентации оболочки (поворотах) в пространстве относительно осей системы координат.

Сформировать алгебраическое уравнение геометрии замкнутого пространства можно двумя основными способами [9]:

1. Из геометрически простых вполне понятных поверхностей, например, плоскостей и поверхностей 2-го порядка можно сформировать уравнение 3-го, 4-го и т.д. любого порядка путем перемножения одного уравнения на другое уравнение. Полученное уравнение будет уравнением порядка сумм порядков перемножаемых уравнений, а геометрия полученного уравнения будет представлять совокупность поверхностей.

Перемножим два уравнения сфер, смещенных по оси *x* в пространстве, и получим уравнение (2) поверхности 4-го порядка (рис. 1).

$$x^4 + y^4 + z^4 + 2x^2y^2 + 2x^2z^2 + 2y^2z^2 - 10x^2 - 6y^2 - 6z^2 + 9 = 0 \qquad (2)$$

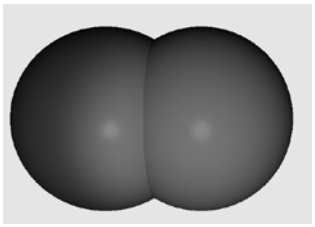


Рис. 1. Две пересекающиеся сферы

2. Изменение знаков и численных значений коэффициентов A уравнения (1). Меняя произвольным образом коэффициенты A в уравнении, можно получить огромное разнообразие поверхностей высших порядков (более 2-ой степени).

Будем модифицировать поверхность двух пересекающихся сфер, показанных на рис. 1.

Если коэффициент при y^2 равный -6 изменить на -34, то получим сглаженную поверхность, где исчезла резкая граница при пересечении сфер (см. рис. 1). Уравнение (3) описывает поверхность (рис. 2).

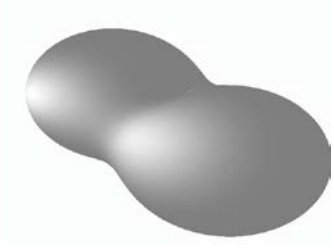


Рис. 2. Сглаженная поверхность 4-го порядка

$$x^4 + y^4 + z^4 + 2x^2y^2 + 2x^2z^2 + 2y^2z^2 - 10x^2 - 34y^2 - 6z^2 + 9 = 0 \qquad (3)$$

Изменяя далее коэффициенты исходного уравнения (2), будем получать поверхности (рис. 3), совсем не похожие на исходную поверхность.

Рассмотренные алгебраические уравнения (1) с фиксированными зна-

чениями коэффициентов описывают конкретную геометрию замкнутого пространства. Замкнутые пространства могут иметь как плоские, так и кривые поверхности, ограничивающие замкнутые пространства. Очень важно помнить при математических операциях, что плоскости и ряд поверхностей бесконечны.

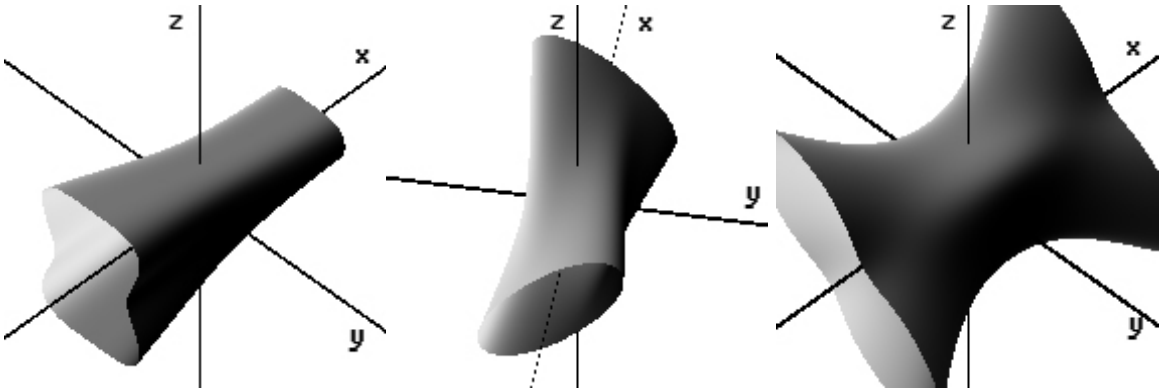


Рис. 3. Модификация поверхности 4-го порядка «Две пересекающиеся сферы»

В данной модели не предусмотрено изменение геометрии замкнутого пространства в процессе горения.

Расчеты температуры горения в каждой точке замкнутого пространства проводятся через определенные промежутки времени от начала горения. Математические модели расчета [10] преобразуются в алгебраическую форму (4).

$$B_k c(t)^p + \ldots + B_1 c(t) + B_0 + B(x_t \times y_t \times z_t) + C = 0, \quad (4)$$

где B – числовой коэффициент алгебраического уравнения термодинамики, любые положительные и отрицательные числа с любой точностью;

t – параметр текущего времени;

c – переменная цвета температуры в точке замкнутого пространства;

x_t, y_t, z_t – координаты точки, где определяется температура;

C – диапазон расчетных цветов температуры

Общее выражение для алгебраической модели горения в замкнутом пространстве имеет вид (5).

$$A_m x^n + A_{m-1} y^n + A_{m-2} z^n + \ldots + A_3 x + A_2 y + A_1 z + A_0 + B_k c(t)^p + \ldots + B_1 c(t) + \\ + B_0 + B(x_t \times y_t \times z_t) + C = 0 \quad (5)$$

Алгебраическая модель (5) представляет собой пятимерную модель, которая позволяет исследовать процесс горения в замкнутом пространстве сложной формы с любой задаваемой точностью в динамическом режиме с

началом возгорания в любой точке замкнутого пространства.

Алгебраические модели в тысячи раз компактней растровых и векторных моделей и практически не меняют своих объемов записи при увеличении размеров объектов и получения более высокой точности описаний.

Алгоритм визуализации процесса горения

Визуализация трехмерной алгебраической модели (5) является переводом трехмерной математической модели в трехмерную растровую модель (рис. 4) и затем отображением ее на экране дисплея.

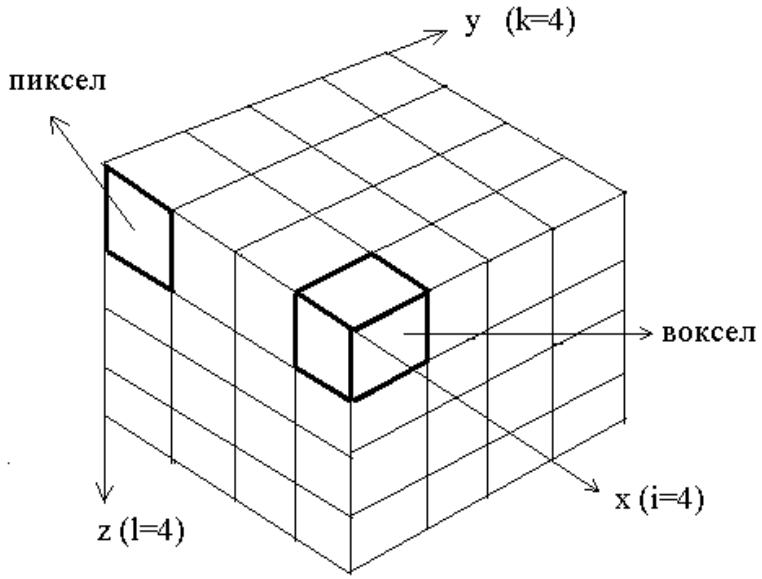


Рис. 4. Трехмерная растровая модель

Трехмерная растровая модель представляет собой набор пиксельных плоскостей (оси X,Z), расположенных перпендикулярно оси наблюдения Y. Для удобства наблюдения пиксельные плоскости раздвигаются на размер воксела по оси наблюдения Y и растровая модель изометрически отображается на экране дисплея (рис. 5.).

В центре каждого воксела отображается точка цветом, определяющим температуру горения в замкнутом пространстве.

Для большего распознавания изображения на плоскости растровой модели плоскости можно сближать или раздвигать. Также можно поворачивать систему координат.

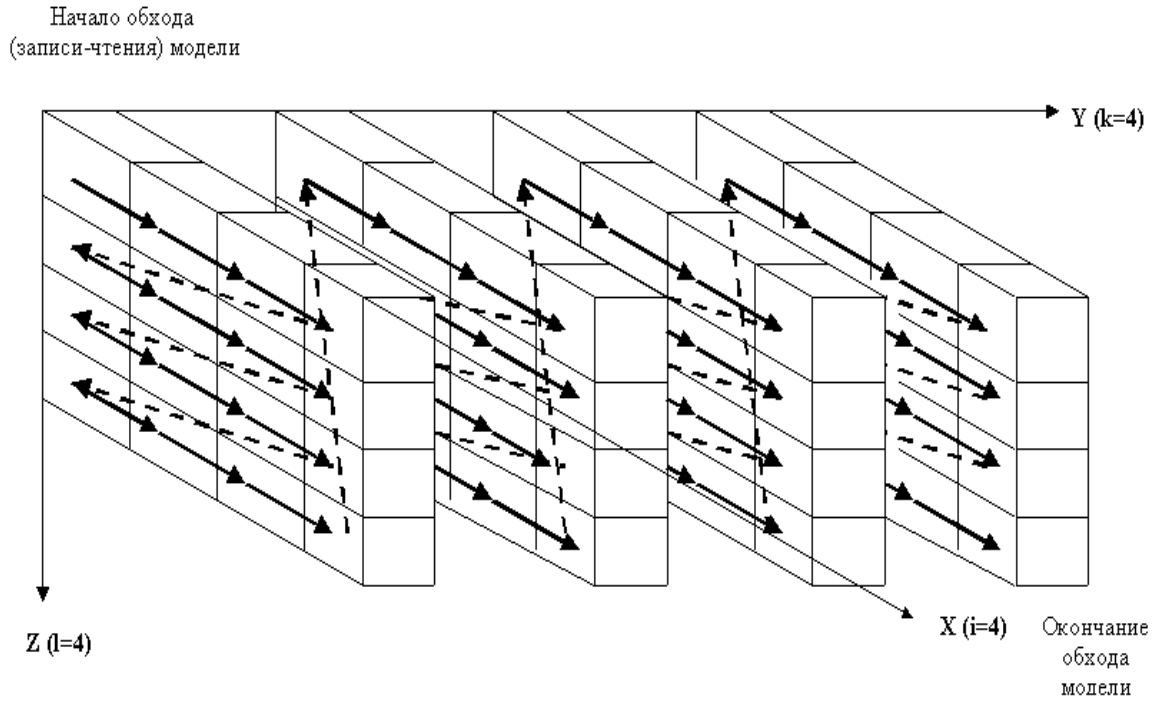


Рис. 5. Отображение растровой трехмерной модели на экране

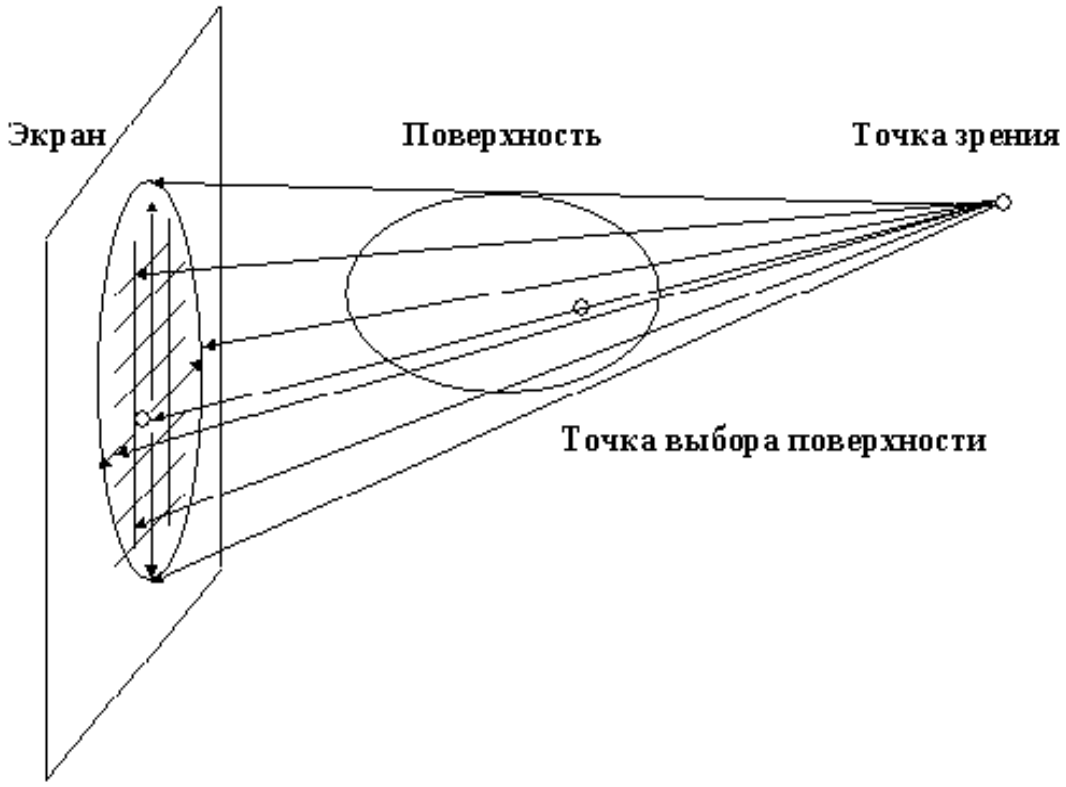


Рис. 6. Направление и порядок шагов при визуализации на выбранной плоскости трехмерной растровой модели

Алгоритм визуализации алгебраической модели следующий:

- Вычисляем разрешение растровой трехмерной модели с учетом физических размеров пиксела на экране дисплея;
- задаем координаты точки возгорания;
- определяем шаг движения от точки к точке в плоскости визуализации;
- подставляем координаты точки в уравнение (1) и определяем принадлежность точки замкнутому пространству, если точка вне замкнутого пространства, точку не визуализируем и выполняем шаг к следующей точке, последовательность шагов в плоскости визуализации на экране дисплея показан на рис. 6;
- если точка расположена в замкнутом пространстве, то подставляем координаты точки в уравнение (4) и вычисляем температуру в точке горения;
- в диапазоне температур определяем номер цвета пиксела;
- в точку растра выводим пиксел цвета температуры в данной точке;
- после визуализации всех точек, принадлежащих замкнутому пространству, переходим в следующую плоскость;
- визуализация заканчивается после прохождения всех плоскостей трехмерной растровой модели, в которых имеются точки, принадлежащие замкнутому пространству.

Заключение

Полученные результаты по алгебраическим моделям могут быть использованы при проектировании и конструировании всевозможных технических средств, в которых проходят процессы горения или возможно появление возгорания, пожаров и взрывов.

Следующими шагами в развитии алгебраических моделей процессов горения может быть увеличение параметров горения и их визуализация, таких как давление в точках замкнутого пространства, скорость и направление движения газов и жидкостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Талантов А.В. Основы теории горения.Казань.КАИ, 1975. 252 с.
2. Киреев В.И., Вайновский А.С. Численное моделирование газодинамических течений. – М.: Изд-во МАИ, 1991. – 253 с.
3. Бочков М.В., Захаров А.Ю., Хвисевич С.Н. Численное моделирование образования N0 при горении метановоздушных смесей в условиях совместного протекания процессов химической кинетики и молекулярной диффузии // Мат. моделирование. 1997. Т. 9. №3. С. 1328.

4. Сиразетдинов Т.К., Иванов В.В. Моделирование процесса горения в камере ВРД // Изв. вузов. Авиационная техника.2002. №2. С.45-48.
5.Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Черенков А.С. Основы теории физико-химических процессов в тепловых двигателях и энергетических установках /М.: "Химия", 2000. – 520 с.
6.Ахметзянов А.М., Алексеев Ю.С., Гумеров Х.С. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2000. – 454 с.
7. Физико-химические процессы в газовой динамике. Справочник в 2-х томах / Под ред. Черного Г.Г., Лосева С.А. М.: Научно-издательский центр механики. 2002.
8. Дегтярев В.М., Щемелинин Д.А. Методика визуализации исходных данных и результатов моделирования блоков и печатных плат электронных телекоммуникационных приборов при комплексных тепловых и механических воздействиях // Вопросы радиоэлектроники. – 2008. - серия Общетехническая (ОТ), Выпуск 1. – С. 44-51.
9. Дегтярев В.М., Казалетов К.Е., Корольков Д.И. Алгебраическое конструирование замкнутых объемов сложной формы // Материалы II-ой Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», сборник научных статей – СПб., 26-27 февраля 2013 г. С. 577-581
10. Дегтярев В.М., Хижняк А.В. Моделирование процессов горения в замкнутых объемах сложной формы // Материалы II-ой Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», сборник научных статей – СПб., 26-27 февраля 2013 г. С.585-590.

УДК 621.074.02.01

А.С. Шлейков, А.В. Батов, В. О. Емельянов, К.В. Мартынов

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ



Алексей Владимирович Шлейков, студент 6-го курса
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: (812)542-71-22, E-mail: martunov@inbox.ru



Александр Владимирович Батов, студент 6 курса,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: (812)542-71-22, E-mail: martunov@inbox.ru



Вадим Олегович Емельянов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: (812) 542-71-22, E-mail: vo-emelianov@inbox.ru



Константин Викторович Мартынов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Тел.: (812)542-71-22, E-mail: martunov@inbox.ru

Аннотация

Статья посвящена энергосберегающей технологии литья по выплавляемым моделям на основе водного раствора кремнезоля производимых в США и КНР.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям, водные растворы кремнезоля, энергосберегающие технологии.

A.V. Shleikov, A.V. Batov, V.O. Emelyanov, K.V. Martynov

ENERGY SAVING TECHNOLOGY OF MOULDING ON MELTED MODELS

Aleksey V. Shleikov[1], e-mail: martunov@inbox.ru;
Alexander V. Batov[1], e-mail: martunov@inbox.ru;
Vadim O. Emelyanov[1], e-mail: vo-emelianov@inbox.ru;
Konstantine V. Martynov[1], e-mail: martunov@inbox.ru.
[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article is devoted to energy-saving technology of molding on melted models patterns on the basis of an aqueous solution silica-sol produced in the United States and China.

Key words: molding on melted models, the aqueous solutions of silica-sol, energy-saving technologies.

Энергосберегающие технологии становятся стандартом при модернизации действующих и проектировании новых литейных цехов. В технологии ЛВМ существенный вклад в энергопотребление дает операция прокалки керамических форм. Процесс поликонденсации для ЭТС завершается только при 900 ^{0}С.

Особенность формирования геля из водных растворов кремнекислоты позволяет проводить прокалку керамических форм до 500 ^{0}С под заливку цветных сплавов с температурой плавления до 1200 ^{0}С. И до 750 ^{0}С под заливку стали, чугуна и никелевых сплавов [2, 3, 5]. На кафедре «МТиОЛП» получены опытные партии отливок методом ЛВМ из Стали 10 (рис. 1). Формы выполнены на основе маршалита и кварцевого песка различных фракций в зависимости от номера слоя. Оболочка четырехслойная, заливка в опорном наполнителе, масса отливки 100 г. Прокалка форм и заливка при температуре 750^{0}С.



Рис. 1. Отливки полюса электрической машины постоянного тока. Материал Сталь 10

Основные поставщики водных растворов кремнезоля в РФ – это КНР и США.

Китайские производители предлагают широкую номенклатуру связующих для ЛВМ. Как показали предварительные исследования на кафедре, значительная часть этих продуктов не соответствует заявленным показателям. Однако некоторые образцы заслуживают внимания как альтернатива ЭТС и американского связующего ЛЮДЕКС-SKF. В частности удовлетворительные характеристики имеет кремнезоль, поставляемый под торговой маркой GS-30. Кремнезоль поступает потребителю в стабилизированном виде без технологических добавок. Особенность связующего – PH = 7. Этот показатель считается критичным при получении оболочек для литья жаропрочных сплавов. Основная масса поставляемых кремнезолей имеет щелочную реакцию. Это связано с процессом стабилизации методом натриевой щелочной подушки [4]. Остаточный натрий образует легкоплавкий силикат натрия, который разупрочняет форму при вытопке.

Стабилизированный водный раствор кремнезоля GS-30 требует введения технологических добавок для улучшения смачивания и седиментационной устойчивости огнеупорной суспензии. В качестве универсальной добавки использовали бутилстирол. Бутилстирол позволяет не только улучшить технологические свойства, но и регулировать сырую прочность. Последнее особенно важно для участков литья по выплавляемым моделям, необорудованным климат-контролем.

Были рассмотрены следующие формовочные материалы: связующее GS-30 с добавкой 10 % латекса, связующее поставляемое под торговой маркой «Армосил» и имеющее pH=4,5. Также было рассмотрено однокомпонентное связующее ЛЮДЕКС-SKF. В качестве огнеупорного наполнителя выступал формовочный песок различных фракций, плавленый кварц, электрокорунд, циркон и шамот. В работе определяли следующие технологические параметры: условная вязкость, прочность на изгиб, газопроницаемость и проницаемость, пористость, качество контактной поверхности керамических форм. Были измерены физические параметры огнеупорной суспензии: краевой угол смачивания (статический), поверхностное натяжение, динамическая вязкость. В работе задействованы следующие методики: краевой угол смачивания определяли теневым методом, поверхностное натяжение определяли методом счета капель, условную вязкость определяли по вискозиметру ВЗ-4, прочность форм и газопроницаемость определяли по методике АО «ЗИЛ» [10,11], пористость – методом пропитки ацетоном, качество контактной поверхности оценивали по изображению, полученному с микроскопа МБС-9.

Условную вязкость огнеупорной суспензии оценивали по воронке ВЗ-4. Для композиции «связующее GS-30 – наполнитель маршалит» условная вязкость возрастает с 14 до 295 секунд при увеличении количества введенного наполнителя от 1,0 до 2,1 кг на 1 дм3 связующего. ЛЮДЕКС-SKF имеет условную вязкость 19 секунд при 1,3 кг наполнителя и 119 секунд при 2,0 кг наполнителя.

Условная вязкость для наполнителя плавленый кварц и связующего GS-30 минимально составляет 16 с, а 300 с – при максимальной массе введенного наполнителя 1,5 кг на 1 дм^3 связующего. При большем количестве наполнителя происходит засорение воронки из-за низкой седиментационной устойчивости суспензии. Специализированные добавки в состав связующего не вводились. Для композиции «связующее ЛЮДЕКС-SKF – наполнитель НКС» условная вязкость возрастает с 29 до 897 с при количестве введенного наполнителя 1,0 кг на 1 дм^3 связующего и 1,7 кг на 1 дм3 связующего соответственно.

Условная вязкость для электрокорунда составляет 15 с при 1,3 кг на 1 дм^3 связующего GS-30 и 300 с при 2,4 кг. Для ЛЮДЕКС-SKF предельную вязкость можно измерить при 3 кг на 1 дм^3 связующего, и она составляет 145 с.

Проведенные измерения условной вязкости показывают, что состав органического полимера, вводимого в связующее в качестве упрочняющей добавки, существенно влияет на вязкость суспензии. Для наполнителя НКС представленные композиции малопригодны вследствие большого расхода связующего материала [8,9].

Динамическая вязкость – существенный показатель при оценке энергопотребления высокоскоростных мешалок. Коэффициент динамической вязкости определяли методом падающего шарика.

Для огнеупорной суспензии на основе маршалита и связующего GS-30 динамическая вязкость растет с 30 до 620 мН•с/м^2. В интервале введенного наполнителя от 1,0 до 2,1кг на 1 дм^3 связующего. Связующее ЛЮДЕКС-SKF имеет меньшую вязкость 75 и 147 мН•с/м^2 при 1,3 и 2,0 кг на 1 дм^3 соответственно, что свидетельствует о высоких тиксотропных свойствах, т.е. наблюдается уменьшение вязкости при приложении нагрузки. Для наполнителя плавленый кварц GS-30 имеет 35 и 717 мН•с/м^2, а ЛЮДЕКС-SKF – 111 и 638 мН•с/м^2, причем предельная вязкость достигается при количестве наполнителя всего 1,7 кг на 1 дм^3 связующего. В условиях производства высокий показатель вязкости приводит к перерасходу связующего и уменьшению термостойкости формы. Электрокорунд в качестве наполнителя имеет динамическую вязкость с GS-30 34 и 865 мН•с/м^2, для ЛЮДЕКС-SKF эти значения значительно меньше – 16 и 112 мН•с/м^2.

Поверхностное натяжение огнеупорной суспензии измеряли методом счета капель. Суть метода состоит в определении усилия отрыва капли от штока известного диаметра.

Суспензия, состоящая из маршалита и связующего GS-30, имеет поверхностное натяжение 23 мН/м для 1 кг наполнителя на 1 литр связующего и 75 мН/м для 2 кг наполнителя. Связующее ЛЮДЕКС-SKF показывает 36 и 48 мН/м в том же интервале наполнителя. Для плавленого кварца и связующего GS-30 поверхностное натяжение составляет 42 и 69 мН/м.

Связующее ЛЮДЕКС-SKF показывает 42 мН/м при 1 кг на 1 литр связующего, а при 1,7 кг – 75 мН/м. При большем увеличении концентрации пылевидной фракции измерение поверхностного натяжения становится невозможным, так как суспензия стекает непрерывным потоком. Для наполнителя электрокорунд и связующего GS-30 – поверхностное натяжение 26 и 53 мН/м. ЛЮДЕКС-SKF показывает 43 мН/м при 1,4 кг на 1 литр и 173 мН/м при 3 кг на 1 литр связующего.

Проведенные измерения показали, что для бинарных связующих типа ЛЮДЕКС-SKF поверхностное натяжение огнеупорной суспензии не является показателем прочностных характеристик формы. Прочность до прокалки определяется свойствами органического полимера [8,9]. Величина поверхностного натяжения характеризует кроющую способность суспензии. Чем ниже σ (сигма) «жидкость – газ», тем лучше кроющая способность.

Краевой угол смачивания огнеупорной суспензии на материале выплавляемых моделей измеряли теневым методом. Для связующего GS-30 и наполнителя маршалит краевой угол составляет 40^0 при 1,1 кг наполнителя на 1 литр связующего. При количестве наполнителя 2 кг на 1 литр краевой угол смачивания 45^0. Связующее ЛЮДЕКС-SKF показывает возрастание краевого угол с 15^0 до 40^0 в том же интервале
введенного наполнителя.

Применение плавленого кварца в качестве наполнителя со связующим GS-30 дает возрастание краевого угла с 30^0 (при 0,8 кг наполнителя на 1 литр связующего) до 45^0 при 1,5 кг. ЛЮДЕКС-SKF с плавленым кварцем имеет краевой угол смачивания меньше, несмотря значительную вязкость. Для количества наполнителя 1,7 кг на 1 литр Θ составляет 43^0. Здесь необходимо отметить, что при большей концентрации наполнителя краевой угол вообще не образуется. Капля суспензии имеет неопределенную форму. Электрокорунд в качестве наполнителя показывает возрастание угла смачивании с 35^0 до 45^0 при использовании GS-30. На связующем ЛЮДЕКС-SKF возрастание составляет с 30^0 до 60^0, максимально возможное количество наполнителя – 3 кг на 1 литр. Измерение краевого угла смачивания для различных наполнителей показало, что бинарные связующие затруднительно использовать с плавленым кварцем. Для НКС (непрозрачное кварцевое стекло) следует применять отечественный материал «Армосил», являющийся однокомпонентным связующим.

Прочность керамических форм измеряли по следующей методике. Керамическую пластину, полученную методом ЛВМ, помещали на призмы, выполненные из первичного шамота. Разрушающую нагрузку передавали нихромовой проволокой. Приспособление помещали в печь сопротивления. Контроль температуры осуществляли хромель-алюмелиевой термопарой, показания считывали с потенциометра КВП-513.

Прочность форм на связующем GS-30 и наполнителе кварцевый песок (табл. 1) $\sigma_{из.}$ возрастает с 6,4 МПа до 12,8 МПа при повышении температуры с 300 ^{0}С до 900 ^{0}С. Прочность до прокалки составляет 10 МПа. Данный показатель важен для случая, когда в качестве наполнителя используется дешевый кристаллический кварц.

Высокоогнеупорные материалы, как показывает практика, позволяют получать прочность в холодном состоянии на уровне 15…20 МПа. Прочность формы при использовании ЛЮДЕКС-SKF несколько ниже и составляет 3,9 МПа и 7,8 МПа соответственно.

Таблица 1

Зависимость прочности керамической формы (МПа) от температуры прокалки.

Температура прокалки, °С	Наполнитель маршалит, связующее:		Наполнитель плавленый кварц, связующее:		Наполнитель электрокорунд, связующее:		Наполнитель шамот, связующее:	
	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10% латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF
300	6,4	3,9	15,9	7,4	9,5	9,3	5,1	7,4
400	7,1	4,7	16,2	8,1	10,7	10,4	5,2	7,6
500	7,8	6,2	16,5	9,4	17,2	11,8	5,5	8,2
600	8,2	6,9	16,6	10,3	18,9	12,5	5,7	8,2
700	10,3	7,2	20,7	13,6	25,4	15,6	9,9	8,6
800	10,9	7,4	26,9	14,9	32,6	19,9	10,5	8,7
900	12,8	7,8	28,1	15,7	37,1	21,7	13,8	8,9

Применение плавленого кварца в качестве наполнителя суспензии и обсыпочного материала показывает максимальную прочность на связующем GS-30 28,1 МПа. На связующем ЛЮДЕКС-SKF 15,7 МПа. В данном случае, кроме меньшей прочности формы, имеет место повышенный в 2 раза расход связующего. Электрокорунд в качестве наполнителя показывает прочность с GS-30 37,1 МПа при прокалке до 900 ^{0}С. ЛЮДЕКС-SKF с тем же огнеупором имеет прочность всего 22 МПа. Применение зернистого шамота в качестве наполнителя показывает прочность на связующем GS-30 – 13,8 МПА при 900 ^{0}С, аналогичный показатель ЛЮДЕКС-SKF составляет 8,9 МПа. Из приведенных данных следует, что связующее GS-30 – весьма конкурентоспособный материал для изготовления ответственных отливок из стали и жаростойких сплавов.

Пористость керамических форм оценивали пропиткой ацетоном. Для

форм, выполненных на связующем GS-30 с наполнителем маршалит (табл. 2), пористость возрастает при прокалке с 27 % до 33 %. Применение связующего ЛЮДЕКС-SKF показывает 25 и 30 % соответственно. Плавленый кварц в качестве наполнителя со связующим GS-30 показывает приблизительно равную пористость 34 % при 300 ^{0}C и при 900 ^{0}C.

ЛЮДЕКС-SKF с плавленым кварцем имеет возрастание пористости с 24 % до 26 %, т.е. показатель также практически не меняется.

Таблица 2

Зависимость пористости керамической формы (%) от температуры прокалки

Температура прокалки, °С	Наполнитель маршалит, связующее:		Наполнитель плавленый кварц, связующее:		Наполнитель электрокорунд, связующее:		Наполнитель шамот, связующее:	
	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF
300	27,3	25,6	34,4	24,1	23,2	29,7	25,5	21,7
400	26,8	27,7	36,7	24,7	28,9	28,9	23,9	22,5
500	25,9	29,3	37,3	25,6	32,1	29,8	25,1	21,9
600	25,6	29,9	37,4	25,3	33,3	29,6	25,7	20,1
700	28,4	30,5	35,9	25,6	37,4	29,2	24,8	22,8
800	30,6	29,8	35,2	25,4	39,5	29,5	26,3	23,7
900	33,7	30,5	34,9	25,8	42,7	30,1	27,5	24,1

Это свидетельствует об идентичности химического состава материалов по высокоогнеупорной составляющей. Использование электрокорунда и связующего GS-30 показывает пористость 23 % при 300 ^{0}C и 42 % при 900 ^{0}C. Связующее ЛЮДЕКС-SKF с корундом имеет практически неменяющуюся пористость порядка 30 %. Шамот в качестве наполнителя для связующего GS-30 имеет пористость 25 % в начале прокалки и 27 % при 900 ^{0}C. Использование ЛЮДЕКС-SKF показывает пористость 22 и 24 % соответственно.

Послойно распределение пористости в форме следующее. Для композиции «GS-30 – маршалит» (табл. 3) пористость первого слоя 81 %, а четырехслойной оболочки 33,7 %. Использование ЛЮДЕКС-SKF показывает пористость первого слоя 70 %, далее идет уменьшение до 30 %. Для плавленого кварца максимальная пористость – 76 % при использовании GS-30. Для связующего ЛЮДЕКС-SKF первый слой имеет пористость 60 %. Электрокорунд в форме, выполненной на GS-30, имеет следующее рас-

пределение пористости: первый слой – 97 %, четырехслойная оболочка – 42 %. Для ЛЮДЕКС-SKF первый слой имеет пористость 57 %, четыре слоя показывают пористость 30 %. Шамот в комбинации с GS-30 имеет пористость на первом слое 80 % и 27 % на четырехслойной оболочке. Использование в качестве связующего ЛЮДЕКС-SKF показывает пористость первого слоя 62 %, с возрастанием числа слоев пористость уменьшается до 24 %.

Таблица 3

Зависимость пористости керамической формы (%) от количества слоев

Номер слоя	Наполнитель маршалит, связующее:		Наполнитель плавленый кварц, связующее:		Наполнитель электрокорунд, связующее:		Наполнитель шамот, связующее:	
	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF
1-й	81,3	69,7	76,7	59,6	97,2	57,3	80,7	62,7
2-й	47,2	48,6	40,3	35,5	57,3	39,8	39,8	29,6
3-й	38,5	34,2	36,8	27,2	45,9	34,7	28,9	28,4
4-й	33,7	30,5	34,9	25,8	42,7	30,1	27,5	24,1

Проницаемость и газопроницаемость керамических форм измеряли на трубчатых образцах (рис. 1), имеющих площадь поверхности, соответствующую площади поверхности стандартного образца.

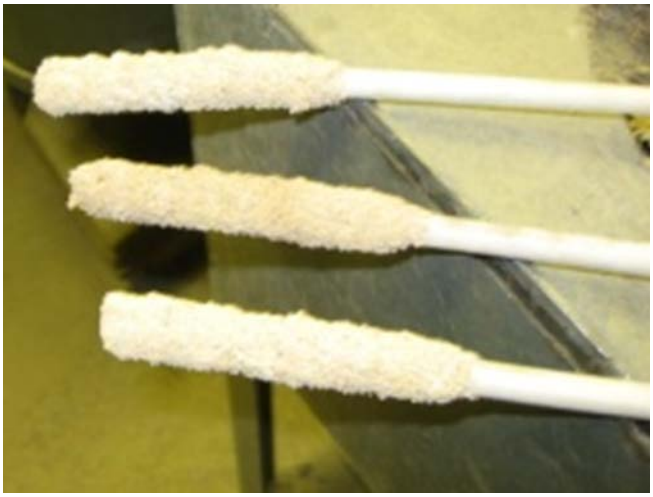


Рис. 2. Пробы для определения газопроницаемости

Давление воздуха создавали прибором 042М, доработанным гозоотводной трубкой (рис. 3, *б*). Количество воздуха при измерении порядка 1 дм^3 с давлением 24 мм водяного столба. Нагрев образца вели в трубчатой печи сопротивления (рис. 3, *а*).



а б

Рис. 3. Устройство для определения газопроницаемости: *а* – печь сопротивления, *б* – прибор 042М

Проницаемость и газопроницаемость керамических форм является показателем процессов, протекающих при прокалке оболочки [10]. Измерение проницаемости при повышении температуры в интервале от 300 до 900 ^{0}С показало, что для форм, выполненных на связующем GS-30 с наполнителем маршалит, проницаемость растет с 380 м^4•10^{-18} до 1300 м^4•10^{-18}. Применение связующего ЛЮДЕКС-SKF понижает проницаемость керамики до 445 м^4•10^{-18}. Более высокая проницаемость форм со связующим GS-30 обусловлена наличием органического полимера и отсутствием силиката натрия, который при плавлении препятствует прохождению воздуха. Использование в качестве наполнителя плавленого кварца со связующим GS-30 показывает максимальную проницаемость 600 м^4•10^{-18}. Для связующего ЛЮДЕКС-SKF этот параметр аналогичен и составляет 204 м^4•10^{-18}. Для электрокорунда с GS-30 максимальная проницаемость составляет 214 м^4•10^{-18}. Для электрокорунда с ЛЮДЕКС-SKF максимальная проницаемость – 283 м^4•10^{-18}. Шамот с GS-30 имеет высокую проницаемость в 950 м^4•10^{-18}. Применение в качестве связующего ЛЮДЕКС-SKF с этим же огнеупором показывает проницаемость 130 м^4•10^{-18}.

Газопроницаемость является технологическим параметром, она позволяет совместно с проницаемостью проследить наличие превращений в форме. Для композиции «GS-30 – маршалит» (табл. 4) имеется характерный провал в интервале 600 … 800 ^{0}С.

Таблица 4

Зависимость газопроницаемости керамической формы ($см^4/н•с•10^{-2}$) от температуры прокалки

Температура прокалки, °С	Наполнитель маршалит, связующее:		Наполнитель плавленый кварц, связующее:		Наполнитель электрокорунд, связующее:		Наполнитель шамот, связующее:	
	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF	GS-30 + 10 % латекса	Людекс-SKF
300	161	62	269	79	63	64	271	32
400	158	66	212	75	55	65	219	30
500	282	63	172	63	54	60	348	32
600	243	64	174	64	58	52	257	32
700	208	64	139	63	50	50	209	33
800	189	68	176	60	53	67	214	34
900	356	127	142	59	62	81	175	39

При использовании ЛЮДЕКС-SKF газопроницаемость монотонно возрастает после 500 ^{0}С. Использование плавленого кварца с GS-30 показывает снижение проницаемости во всем интервале температур. Для связующего ЛЮДЕКС-SKF характерно падение газопроницаемости. По-видимому, это связано с диффузионным спеканием пылевидной фракции с кремнегелем связующего [6, 7]. Электрокорунд с GS-30 имеет ступенчатую кривую газопроницаемости. При использовании ЛЮДЕКС-SKF кривая имеет провал, связанный с полиморфными превращениями примесей, содержащихся в наполнителе. Шамот в качестве огнеупорного наполнителя с GS-30 показывает ступенчатую кривую газопроницаемости. Для ЛЮДЕКС-SKF газопроницаемость плавно возрастает. Результаты измерения газопроницаемости и проницаемости показали, что полиморфные превращения в керамической форме при прокалке имеют место и для связующего GS-30, и для ЛЮДЕКС-SKF. Исследование контактной поверхности, выполненное с помощью микроскопа МБС-9, показало, что связующее ЛЮДЕКС-SKF дает качественную поверхность лишь на наполнителях корунд и НКС (непрозрачное кварцевое стекло). Связующее GS-30 на первом слое может применяться для машиностроительных заготовок с шероховатостью литой поверхности 10…20 Rz. Для получения меньшей шероховатости требуется использование на первом слое ЭТС [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Бречко А.А. Особенности формирования структуры и поверхности контактного слоя керамических форм на основе ЭТС-40 и Сиалит-20С // Литейщик России. №2. 2006. С. 24-27.
2. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Бречко А.А. Прочность керамических форм для литья по выплавляемым моделям. Сборник трудов 9-го съезда литейщиков, Уфа, 21 – 23 апреля 2009 г.
3. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Пречесный М.А., Мутилов В.Н. Керамические формы для отливок повышенной точности из высоколегированных сталей. Сборник трудов 7-й Международной научно-практической конференции “Исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности”. Т. 1. Санкт-Петербург, 28 – 30 апреля 2009 г. С. 368-370.
4. Емельянов В.О. Формирование структуры и свойств керамических форм. Санкт-Петербург, РИО, Издание Санкт-Петербургского института машиностроения, 2010.
5. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Рагозин С.М., Пречесный М.А. Литейная керамика на кремнезольном связующем. Российский научно-технический журнал “Инструмент и технологии”, Санкт-Петербург, 28-й выпуск 2010 г. С. 10-18.
6. Берг П.П. Формовочные материалы. М.: Машиностроение, 1963.
7. Бречко А.А. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами. Л.: Машиностроение, 1982.
8. Родионова О.Е., Мартынов К.В., Емельянов В.О. Бинарное связующее для керамических форм. Материалы Всероссийской научно-технической конференции “Новые материалы и технологии”. Т. 1. М., 16 – 18 ноября 2010 г. С. 36.
9. Шуманская Я.В., Мартынов К.В., Емельянов В.О. Свойства керамических форм на основе кристаллического кварца и связующего JS-30 с добавкой бутилстирола. Материалы Всероссийской научно-технической конференции “Новые материалы и технологии”. Т. 1. М., 16 – 18 ноября 2010 г. С. 42.
10. Шкленник Я.И. Литье по выплавляемым моделям. М.: Машиностроение, 1984.
11. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Мутилов В.Н., Соколов А.В., Суханова В.П. Водный раствор кремнезоля как альтернатива готовым связующим в технологии ЛВМ // Литейное производство. 2012. № 4. С. 18 – 21.