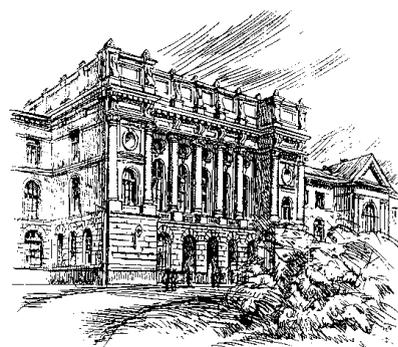


1 (190)/2014



Научно-технические ведомости СПбГПУ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

(прежнее название «Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование»)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (председатель);
Алферов Ж.И., академик РАН;
Згуровский М.З., ин. член РАН, академик НАН Украины;
Костюк В.В., академик РАН;
Лагарьков А.Н., академик РАН;
Лопота В.А., чл.-корр. РАН;
Окрепилов В.В., академик РАН;
Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН;
Примаков Е.М., академик РАН;
Рудской А.И., чл.-корр. РАН;
Тендлер М.Б., ин. член РАН (Швеция);
Федоров М.П., академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (главный редактор);
Кондратьев С.Ю., д-р техн. наук, профессор
(зам. главного редактора);
Акопова М.А., д-р пед. наук, профессор;
Башикарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор;
Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор;
Гуменюк В.И., д-р техн. наук, профессор;
Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор;
Иванов А.В., д-р техн. наук;
Ильин В.И., д-р физ.-мат. наук, профессор;
Кириллов А.И., д-р техн. наук, профессор;
Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;
Кузнецов Д.И., д-р филос. наук, профессор;
Снетков В.Н., д-р полит. наук, профессор;
Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev Yu.S. — full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St.Petersburg State Polytechnical University (head of the editorial council);
Alferov Zh.I. — full member of the Russian Academy of Sciences;
Zgurovskiy M.Z. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Sciences of Ukraine;
Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences;
Lagar'kov A.N. — full member of the Russian Academy of Sciences;
Lopota V.A. — corresponding member of the Russian Academy of Sciences;
Okrepilov V.A. — full member of the Russian Academy of Sciences;
Paton B.E. — full member of the Russian Academy of Sciences and the National Academy of Sciences of Ukraine;
Primakov E.M. — full member of the Russian Academy of Sciences;
Rudskoy A.I. — corresponding member of the Russian Academy of Sciences;
Tendler M.B. — foreign member of the Russian Academy of Sciences (Sweden);
Fedorov M.P. — full member of the Russian Academy of Sciences

JOURNAL EDITORIAL BOARD

Vasiliev Yu.S. — full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St.Petersburg State Polytechnical University (editor-in-chief);
Kondratyev S.Yu. — Dr.Sc. (tech.), prof.
(deputy editor-in-chief);
Akopova M.A. — D.Ed., prof.
Bashkarev A.Ya. — Dr.Sc. (tech.), prof.;
Boronin V.N. — Dr.Sc. (tech.), prof.;
Gumenyuk V.I. — Dr.Sc. (tech.), prof.;
Degtyareva R.V. — Dr.Sc. (history), prof.;
Ivanov A.I. — Dr.Sc. (tech.), prof.;
Il'in V.I. — Dr.Sc. (phys. math.), prof.;
Kirillov A.I. — Dr.Sc. (tech.), prof.;
Kozlov V.N. — Dr.Sc. (tech.), prof.;
Kuznetsov D.I. — Dr.Phil., prof.;
Snetkov V.N. — Dr.Sc. (political science), prof.;
Tolochko O.V. — Dr.Sc. (tech.), prof.

Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006 г.)

Подписной индекс **18390** в каталоге «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать».

С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 294-47-72.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014

Содержание

К 115-летию основания СПбГПУ

| | |
|--|----|
| Рудской А.И. Научно-педагогическая школа СПбГПУ в области металлургии и металлургии..... | 7 |
| Васильев Ю.С. Политехники в Совете ректоров вузов Санкт-Петербурга..... | 13 |
| Морачевский А.Г. Дмитрий Иванович Менделеев и его научные связи с профессорами Политехнического института (к 180 летию со дня рождения Д.И. Менделеева)..... | 19 |
| Галышев Ю.В., Добрецов Р.Ю., Поршнева Г.П., Худорожков С.И. Исследования и разработки ученых СПбГПУ в области оборонной техники (по материалам IX-й международной выставки вооружения, военной техники и боеприпасов) | 26 |

Энергетика. Электротехника

| | |
|--|----|
| Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И. Использование банка параметрических моделей при проектировании гидроэнергетических установок | 33 |
| Кальм Н.А., Николаева Е.А., Беляев А.Н. Управление газопоршневыми агрегатами в условиях резкопеременной нагрузки электроэнергетической системы | 45 |
| Козлов В.С., Синолицкий А.Ф., Кольсун В.А. Синтез математического аппарата управления активными фильтрами на основе p - q теории | 54 |
| Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Митяков В.Ю., Османов В.В. Разработка и промышленные испытания системы теплотриции на основе градиентных датчиков теплового потока | 61 |
| Захаров А.В., Шпензер Г.Г., Тюхтяев А.М. Устойчивость потока в последних ступенях низкого давления паровых турбин на переменных режимах..... | 70 |
| Тимощенко К.П., Юрганов А.А. Ключевые особенности проектирования систем управления возбуждением синхронных машин..... | 75 |
| Абайдуллин Б.Р. Изменения характеристик тепломассопереноса в коаксиальном реакторе в фиксированных областях при возрастании параметра Франк-Каменецкого | 82 |

Металлургия и материаловедение

| | |
|--|-----|
| Мамутов В.С., Шапошников И.А. Экспериментальная оценка эффективности индукторных систем для магнитно-эластоимпульсной штамповки | 89 |
| Аносова И.В., Дьячкова Т.П., Орлова Н.В. Исследование процессов модифицирования углеродных дисперсных носителей полианилином..... | 96 |
| Мамутов А.В., Мамутов В.С. Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA..... | 101 |
| Горский С.Ю., Дьячкова Т.П., Буракова Е.А. Газофазная функционализация углеродных нанотрубок: проблемы реализации метода | 108 |
| Колбасников Н.Г., Безобразов Ю.А. Влияние температуры правки готового проката на конечные свойства труб большого диаметра..... | 113 |
| Пряхин Е.И., Шаропова Д.М. К вопросу о деградации свойств низколегированных конструкционных сталей при кратковременных нагревах..... | 121 |
| Юркинский В.П., Фирсова Е.Г. Электропроводимость растворов системы хлорид лития — бутанол — вода..... | 130 |

Машиностроение

| | |
|--|-----|
| Яковлев С.Н. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статической нагрузке | 137 |
| Мазурин В.Л. Определение статической деформации полиуретановых амортизаторов, работающих на сдвиг | 143 |
| Соколов С.А., Краснова С.В. Расчет на прочность и сопротивление усталости ездовых балок с катанием по нижнему поясу..... | 149 |
| Никитин С.В. Расчетное определение упруго-вязких параметров конвейерных цепей..... | 156 |
| Терентьев Д.В., Платов С.И., Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И. Разработка рациональных режимов смазывания подшипниковых узлов слябовых машин непрерывного литья заготовок..... | 164 |

Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования

| | |
|---|-----|
| Ташевский А.Г. Математические модели продолжительности жизненного цикла технических систем | 169 |
| Куранов А.Л., Корабельников А.В., Михайлов А.М. Конверсия углеводородного топлива в элементах теплозащиты летательных аппаратов | 179 |
| Башкарёв А.Я., Беспалова Н.Н. Зависимость адгезии битума от температурно-временных режимов приготовления асфальтобетонных смесей | 186 |
| Исупова И.Л., Трусов П.В. Моделирование поведения сталей с учетом диффузионных фазовых превращений..... | 191 |
| Антонов В.И., Давыдов Р.В., Калинин Н.В. Широкодиапазонные уравнения состояния алюминия и меди для моделирования воздействия лазерного излучения на вещество | 198 |
| Вечеров И.А., Ненашев А.П., Парфентьев А.А. Экспериментальное исследование и численные расчеты деформации однослойного квазибессилового магнита | 204 |

Техносферная безопасность

| | |
|---|-----|
| Гуменюк В.И., Кармишин А.М., Киреев В.А. Теоретические методы оценки опасности аварий взрывоопасных объектов..... | 212 |
| Никулин М.С., Сильников М.В., Дубаренко К.А. О развитии и внедрении методов статистики ускоренных испытаний для анализа безопасности, надежности и качества продукции высоких технологий | 217 |
| Яковлев В.В., Гравит М.В., Недрышкин О.В. Перспективы развития программных комплексов расчета пожарного риска и проектирования процессов пешеходной динамики в условиях пожара | 224 |
| Гуменюк В.И., Гравит М.В., Кармишин А.М. Проблемные вопросы оптимизации средств и способов тушения лесных пожаров..... | 231 |

Вопросы образования

| | |
|--|-----|
| Кожевников Н.М. Неклассические идеи в современном курсе общей физики..... | 236 |
|--|-----|

Хроника событий

| | |
|--|-----|
| Бабкин А.В. Сотрудники СПбГПУ — руководители научных и научно-педагогических школ | 243 |
| Кесаманлы Ф.П. Ученые-политехники, прославившие нашу страну. Член-корреспондент АН СССР Яков Ильич Френкель (к 120-летию со дня рождения)..... | 246 |

Contents

On the occasion of the 115th anniversary of the foundation of SPbSPU

| | |
|--|----|
| Rudskoy A.I. <i>The SPbSPU scientific and pedagogical school in metal science and metallurgy</i> | 7 |
| Vasiliev Yu.S. <i>St. Petersburg State Polytechnical University alumni in the council of rectors of St. Petersburg universities</i> | 13 |
| Morachevsky A.G. <i>Dmitri I. Mendeleev and his scientific connections with the professors of the Polytechnic Institute (the 180th anniversary D.I. Mendeleev)</i> | 19 |
| Galishev Yu.V., Dobretsov R.Yu., Porshnev G.P., Hoodorozhkov S.I. <i>Research and development of SPbSPU scientists in defense technique (based on the IX international exhibition of arms, military equipment and ammunition)</i> | 26 |

Energetics. Electrical engineering

| | |
|--|----|
| Vasiliev Yu.S., Kubyshkin L.I. <i>Use of parametric models in design hidropowers plants</i> | 33 |
| Kalm N.A., Nikolaeva E.A., Belyaev A.N. <i>Gas engine power plant control in electric system with abruptly variable load</i> | 45 |
| Kozlov V.S., Sinolitsyy A.F., Kol'sun V.A. <i>Mathematical tool synthesis for active filter control based on irp p-q theory</i> | 54 |
| Grigoryev K.A., Roundyguine Yu.A., Mityakov V.Yu., Osmanov V.V. <i>Development and industrial testing of a thermal measuring system based on gradient heat flux sensors</i> | 61 |
| Zakharov A.V., Shpenzer G.G., Tyukhtyaev A.M. <i>Flow stability in LPC last stages in varying operating modes</i> | 70 |
| Timoshchenko K.P., Urganov A.A. <i>Main features of designing of the control systems by the excitation of synchronous machines</i> | 75 |
| Abajdullin B.R. <i>Changes of heat and mass transfer characteristics in a coaxial reactor at fixed areas with increasing Frank-Kamenetsky parameter</i> | 82 |

Metallurgy and materials technology

| | |
|---|-----|
| Mamutov V.S., Shaposhnikov I.A. <i>Experimental estimation of efficacy of coil systems for electromagnetic stamping by polyurethane</i> | 89 |
| Anosova I.V., Dyachkova T.P., Orlova N.V. <i>Study of modification of carbon dispersed supports with polyaniline</i> | 96 |
| Mamutov A.V., Mamutov V.S. <i>Simulating the electro-hydraulic sheet metal forming using LS-DYNA</i> | 101 |
| Gorski S.Yu., Dyachkova T.P., Burakova E.A. <i>Gas-phase functionalization of carbon nanotubes: problems of implementation of the method</i> | 108 |
| Kolbasnikov N.G., Bezobrazov Yu.A. <i>Finished rolled stretching temperature effect on mechanical properties formation of large diameter pipes</i> | 113 |
| Pryahin E.I., Sharapova D.M. <i>About deterioration of properties of low-alloyed structural steels at short-term heating procedures</i> | 121 |
| Yurkinsky V.P., Firsova E.G. <i>Electrical conductivity of lithium chloride-butanol-water solutions</i> | 130 |

Mechanical engineering

| | |
|--|-----|
| Yakovlev S.N. Calculation of polyurethane details which are working on shrinkage under static load..... | 137 |
| Mazurin V.L. Static deformation determination of polyurethane damper working on shear strain | 143 |
| Sokolov S.A., Krasnova S.V. Calculation of strength and fatigue resistance of sled riding beamson the lower waistband | 149 |
| Nikitin S.V. Calculated definition of visco-elastic parameters of the conveyor chains | 156 |
| Terentiev D.V., Platov S.I., Zhirkin Yu.V., Mironenkov E.I. Development of rational mode of lubrication of bearing units slab continuous casting machines | 164 |

Mathematical Methods. Modeling. Experimental studies

| | |
|--|-----|
| Tashevsky A.G. Mathematical models of life cycle duration of technical systems | 169 |
| Kuranov A.L., Korabelnikov A.V., Mikhaylov A.M. Conversion of hydrocarbon fuel in aircraft thermal protection elements | 179 |
| Bashkarev A.Y., Bepalova N.N. Dependence adhesion of bitumen from the time-temperature modes on making asphalt mixes | 186 |
| Isupova I.L., Trusov P.V. Steel behaviour simulation in the range of diffusion transformations | 191 |
| Antonov V.I., Davydov R.V., Kalinin N.V. Aluminum and copper wide-range equation of state for modeling exposure to laser radiation on matter..... | 198 |
| Vechev I.A., Nenashev A.P., Parfentiev A.A. Experimental study end numerical calculations deformation of the single-layer quasi-force-free magnet | 204 |

Technosphere safety

| | |
|--|-----|
| Gumenyuk V.I., Karmishin A.M., Kireev V.A. Theoretical methods of estimation of emergency danger on explosible objects | 212 |
| Nikulin M.S., Silnikov M.V., Dubarenko K.A. On the development and adoption of accelerated tests statistics methods for safety, reliability and quality analysis of high technology products..... | 217 |
| Yakovlev V.V., Gravit M.V., Nedryshkin O.V. Development prospects software complex fire hazard calculations pedestrian and design process dynamics under fire..... | 224 |
| Gumenyuk V.I., Gravit M.V., Karmishin A.M. Problem questions of optimization means and methods forest fire extinguishing..... | 231 |

Educational issues

| | |
|---|-----|
| Kozhevnikov N.M. Non-classical ideas in the contemporary general physics course..... | 236 |
|---|-----|

Chronicle of events

| | |
|--|-----|
| Babkin A.V. Employees of SPbSPU — heads of scientifics and pedagogicals shools | 243 |
| Kesamanly F.P. Scientists-politechnics, glorified our country. Correspondings member of the AS USSR Yakov Frenkel (the 120th anniversary of his birth)..... | 246 |



К 115-летию основания СПбГПУ

УДК 378.1:669

А.И. Рудской

НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА СПБГПУ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ И МЕТАЛЛУРГИИ

A.I. Rudskoy

THE SPBSPU SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL SCHOOL IN METAL SCIENCE AND METALLURGY

Статья посвящена истории создания и развития, а также современному состоянию научно-образовательной и научно-исследовательской работы и стратегии деятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в области металлургии и металловедения.

МЕТАЛЛУРГИЯ; МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ; МАШИНОСТРОЕНИЕ; ВЫСШЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ; САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ.

Shows the history of creation and development, modern state scientific and education and research work, as well as assistance strategy, St. Petersburg State Polytechnic University in the field of metallurgy and physical metallurgy.

METALLURGY; METAL SCIENCE; MECHANICAL ENGINEERING; HIGHER VOCATIONAL EDUCATION; ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY.

19 февраля 1899 года Николай II одобрил проект о создании Санкт-Петербургского политехнического института. Стремительный рост промышленного производства на рубеже XIX–XX веков потребовал проведения реформы системы высшего образования, важнейшим принципом которой стало, по словам С.Ю. Витте*, создание в России «высших учебных заведений в форме политехнических институтов, которые содержали бы в себе различные отделения человеческих знаний, но имели бы организацию не технических школ, а университетов».

Санкт-Петербургский политехнический институт (в настоящее время — Санкт-Петербургский государственный политехнический университет — СПбГПУ) был основан после детального изучения передового опыта 36 ведущих технических высших школ Европы.

* С.Ю. Витте (1849–1915 гг.) — министр финансов России в 1892–1903 гг.

1 октября 1902 года состоялось торжественное открытие Института как «*совершенно нового и своеобразного высшего учебного заведения, являющегося сосредоточением выдающихся исследователей новейших отраслей прикладных знаний*». Первый учебный год в Политехническом институте официально начался 2 октября 1902 года. По замыслу Сергея Юльевича Витте Политехнический институт должен был содержать в себе различные отделения человеческих знаний и иметь организацию университета, способную «наиболее развивать молодых людей, давая им общечеловеческие знания» для «соприкосновения с товарищами, занимающимися всевозможными специальностями».

В состав Политехнического института первоначально входили четыре отделения — металлургическое с электрохимическим подотделом, электромеханическое, кораблестроительное и экономическое, представлявшие собой, говоря современным языком, приоритетные направ-

ления развития науки, техники и технологий в России на рубеже XIX–XX веков. Учебный план института был разработан особой комиссией под председательством генерала Николая Павловича Петрова, в которую входили профессор Александр Сергеевич Посников, Дмитрий Иванович Менделеев, Николай Александрович Меншуткин, Виктор Львович Кирпичёв и директор — князь Андрей Григорьевич Гагарин.

Первый прием был ограничен 270 студентами, а с 1907 года число поступающих в Политехнический институт увеличилось до 1295 человек и до самой революции 1917 года почти не подвергалось изменению.

В 2012 году в Университет, включая филиалы, было принято по всем формам обучения 6526 студентов.

Первый директор Политехнического, князь Андрей Григорьевич Гагарин, особое внимание уделял воспитанию студентов института. Примеру князя Гагарина следовал и преподавательский состав. Между сотрудниками института и студентами были выстроены такие дружеские взаимоотношения, которых не было ни в одном высшем учебном заведении России. Профессора не ограничивались только чтением лекций. Главная академическая работа сосредоточивалась на практических занятиях.

Металлургическое отделение в Политехническом институте было уникальным. Именно на нем впервые в России была проведена специализация преподавания цикла горнозаводских наук: горное дело было отделено от металлургического, и учащиеся Политехнического института после его окончания впервые в России стали «инженерами-металлургами», а не «горными инженерами». Металлургическое отделение стало готовить инженеров не только для промышленности, но и для научно-исследовательской работы в области металлургии. Уже в 1911 году петербургские газеты писали: «Если из других институтов выходят узкие специалисты, то из Политехникума — наиболее разносторонне образованные люди».

Основатели Политехнического института во главе с министром финансов С.Ю. Витте считали, что институт должен охватывать и развивать технические науки *«шире и глубже, чем было бы достаточно для университетской науки»* и что *«только при условии самого широкого раз-*

вития научной работы в Институте может быть обеспечена подготовка инженеров всесторонне развитых, обладающих глубокими знаниями в области техники и технических наук и умеющих применить эти знания для производственных нужд». Основные дисциплины в Политехническом институте, в том числе в области металлургии и металловедения, преподавали выдающиеся ученые России, что с первых дней предопределило гармоничное единство учебного процесса и научной работы. В разные годы преподавательской и научной деятельностью в Политехническом занимались академики и члены-корреспонденты Российской академии наук: А.Ф. Иоффе, А.А. Байков, Н.Т. Гудцов, Н.В. Агеев, М.А. Павлов, М.М. Карнаухов, В.Е. Грум-Гржимайло, И.А. Одинг, Я.И. Френкель, И.М. Павлов, В.С. Смирнов.

Многие поколения выпускников Политехнического института в значительной степени определили отечественный научно-технический потенциал и внесли значительный вклад в создание и развитие таких областей науки, как математика, теоретическая и техническая физика, теоретическая и прикладная механика, металлургия и материаловедение, техническая кибернетика, а также наукоемких отраслей промышленности — металлургии, машиностроения (включая авиастроение, судостроение, электро- и энергомашиностроение, приборостроение), топливно-энергетического и оборонно-промышленного комплексов.

Мировую известность получили работы металлургической школы политехников. Д.К. Чернов, один из инициаторов и создателей Политехнического института, является родоначальником новой области науки — металловедения и термической обработки металлов. Значительны заслуги политехников в развитии металловедения как научной основы разработки новых сплавов, способов изготовления и обработки металлов и сплавов.

Первые в России металлографические лаборатории были созданы политехниками: академиком А.А. Байковым — в Политехническом институте (ему также принадлежит приоритет в исследовании металлов при высоких температурах), профессором А.А. Ржешотарским — на Обуховском заводе, Н.И. Беляевым — на Путиловском заводе.

Академик Н.Т. Гудцов, развивая научные идеи Д.К. Чернова и А.А. Байкова, основал новую школу в области металловедения и термической обработки стали. Николай Тимофеевич разработал теории твердых растворов, кристаллизации стали, отпуска закаленной стали, графитизации стали, физическую теорию ликвации; изучал влияние примесей на строение и свойства стали. Н.Т. Гудцов первым в стране составил фундаментальные курсы для вузов: «Специальная сталь, ее свойства, обработка и применение» (1920) и «Металлография и термическая обработка стали» (1924).

Член-корреспондент АН СССР И.А. Одинг, автор известной книги «Прочность металлов» и 15 других книг, был основоположником и руководителем фундаментальных исследований прочности металлов и методов испытания механических свойств металлов в нашей стране.

Проводившиеся в 1925–1938 годах в Политехническом институте под руководством академика Н.В. Агеева научно-исследовательские работы, посвященные изучению строения металлических материалов с помощью новых тогда рентгеноструктурных методов, позволили глубже проникнуть в природу сплавов и развить самостоятельное направление науки о металлах. Монографии Н.В. Агеева «Рентгенография металлов и сплавов» (1932 г.) и «Термический анализ металлов и сплавов» (1936 г.) были в свое время лучшими пособиями по рентгенографии и физико-химическому анализу для металлургических факультетов высших учебных заведений.

За четыре десятилетия работы в Политехническом институте академик М.А. Павлов много сделал для проектирования крупнейших металлургических заводов, доменных печей и сталеплавильных агрегатов. Несколько поколений металлургов учились по его учебнику «Металлургия чугуна».

Первую научную теорию мартеновских и других пламенных печей создал член-корреспондент АН СССР В.Е. Грум-Гржимайло. Под руководством В.Е. Грум-Гржимайло и Н.И. Беляева был спроектирован и построен в Московской губернии завод «Электросталь» — первое в России предприятие для выплавки качественной стали. Позднее в организованном В.Е. Грум-Гржимайло «Бюро по проектированию печей»

были разработаны проекты строительства цехов и печей Кузнецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов.

С Политехническим институтом тесно связана деятельность член-корреспондента АН СССР П.П. Федотьева, создателя физико-химических основ производства алюминия. В 30-е годы выпускники института возглавили строительство многих алюминиевых заводов в СССР: Волховского (главный инженер Ю.В. Баймаков), Днепровского и Уральского (спроектированы П.Ф. Антипиным), Красноярского и Саянского (спроектированы Н.А. Калужским), Бокситогорского комбината (директор А.Г. Гамзин).

Работы академика М.М. Карнаухова, профессоров Н.Н. Саввина и Ю.А. Нехендзи способствовали созданию признанной ленинградской школы литейщиков. Успехи отечественной науки по сварке металлов связаны с исследованиями профессора Н.О. Окерблома и его учеников.

Большой вклад в разработку теории и технологии обработки металлов давлением внесли члены-корреспонденты АН СССР И.М. Павлов и В.С. Смирнов. Исследования В.С. Смирнова стали определяющими для разработки и промышленного использования поперечной и поперечно-винтовой прокатки. Он же одним из первых начал применять ЭВМ в теоретических исследованиях.

Важным вкладом в развитие порошковой металлургии стали работы профессора Я.И. Френкеля и его учеников, заложившие основы теории спекания. Для внедрения в производство этого метода получения металлов и металлических изделий многое сделали В.С. Смирнов и его ученик — профессор А.К. Григорьев.

Металлургическая наука перешла на новый уровень развития благодаря научной деятельности выпускника Политехнического института академика И.В. Горынина. Под его руководством разработан новый класс высокопрочных свариваемых и коррозионностойких сталей, титановых и алюминиевых сплавов для атомных энергетических установок, подводных лодок, глубоководных аппаратов, морских нефтедобывающих платформ и других сооружений, работающих в особо неблагоприятных и экстремальных условиях.

Сохраняя вековые традиции, ученые-металлурги, металловеды и технологи СПбГПУ

и в настоящее время ведут обширные теоретические и экспериментальные исследования, работают над решением комплекса задач прикладного характера, в число которых входят: разработка новых и совершенствование существующих технологий термической и пластической обработки конструкционных и функциональных сталей и сплавов; создание нового класса металлических материалов, в том числе так называемых интеллектуальных сплавов, а также сплавов с уникальными свойствами (такими, как повышенная прочность, жаропрочность, сверхпластичность, сверхпроводимость, высокотемпературная и низкотемпературная структурная стабильность, высокая демпфирующая способность, эффект памяти формы и др.), порошковых и композиционных материалов; разработка новых технологий переработки вторичного металлургического сырья.

Отличительная характеристика работ ученых-металлургов СПбГПУ в настоящее время — это создание новых функциональных и smart-материалов «с применением современных нанотехнологий», материалов с заданными физико-механическими и управляемыми свойствами; сплавов, керамик, композитов и композитных структур, которые являются, с одной стороны, «материалами-конструкциями», а с другой — составной частью или компонентом макроконструкции (автомобили, самолеты и т. д.).

С даты своего основания СПбГПУ пережил не одно историческое потрясение, устоял, сохранил научные и инженерные школы, традиции, подготовил сотни тысяч специалистов, показал высокую способность к адаптации, адекватной реакции на резко меняющиеся условия существования, особенно в последние двадцать лет, сумев быстро перейти из режима «выживания» в режим роста и развития.

Полученный в 2010 году статус национального исследовательского университета (НИУ) открыл новые возможности для разработки фундаментальных и прикладных научных проектов. Основной целью Программы развития НИУ СПбГПУ является «модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности националь-

ной экономики». Интеграция науки, образования и инновационных процессов в современных условиях видится как один из решающих факторов развития общества, основанного на знаниях.

В последние годы в НИУ СПбГПУ проведено техническое переоснащение по многим научным направлениям. Так, были введено в действие современное оборудование: комплекс Gleeble-3800 фирмы Dynamic Systems Inc. (США) для физического моделирования процессов термомеханической обработки и сварки, тестирования механических свойств и исследования структуры, который обеспечивает возможность проведения многоэтапного физического моделирования процессов обработки металлов; испытательные машины Zwick / Roel 1-100 (Германия); копер RKP-450 фирмы Zwick / Roell для испытаний на ударную вязкость; универсальный твердомер Zwick ZHU 250; криогенный атомно-силовой микроскоп AttoAFM I фирмы AttoCubeSystems (Германия); система «Нанофаб-25», представляющая собой комплексную установку для анализа и модификации поверхности, а также создания поверхностных наноструктур; Оже-спектрометр и многое другое.

Сегодня, в первую очередь, в НИУ СПбГПУ в рамках реализации Программы 5–100–2020, направленной на повышение конкурентоспособности университета в международном научно-образовательном пространстве, осуществляется подготовка специалистов для образования, науки и наукоемкого производства, позволяющая политехникам быстро адаптироваться к меняющимся потребностям современного общества. Стратегия трансфера знаний, характеризующая задачи университета, предполагает интеграцию «треугольника знаний» — образования, исследований и инноваций. Принципы полифункциональности университета, формирования вокруг него специфического научно-технического и экономического пространства, особой интеллектуальной среды — все это направлено на удовлетворение потребностей общества в новых знаниях и специалистах.

Один из основных элементов классического инженерного образования состоит в гармоничном соединении науки и практики. В НИУ СПбГПУ этот принцип реализуется через усиление интеграции образования с научными

исследованиями, передовыми технологиями и инновационными проектами для реального сектора экономики. Традиционно сложившаяся в нашем университете практика подготовки специалистов в инженерных школах заключается в ориентации студентов на участие в выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по заказам отечественных и зарубежных промышленных предприятий (например, в металлургии — работы по созданию новых материалов и обработке новых производственных технологий). Это могут быть научно-исследовательские работы, выполняемые совместно со студентами старших курсов, аспирантами, преподавателями, представителями отраслевых или академических институтов.

Работа над реальными проектами в нашем вузе реализуется на кафедрах, в лабораториях и центрах, в которых преподаватели, аспиранты и студенты из разных структурных подразделений выполняют комплексные проекты по заказам крупнейших металлургических, машиностроительных и топливно-энергетических предприятий, а также предприятий транспортной, информационно-коммуникационной и строительной отраслей. Среди них: ОАО «Газпром», государственная корпорация «Росатом», государственная корпорация «Ростех», ОАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы», ОАО «РусГидро», ОАО «Автоваз», ОАО «КБСМ», ОАО «Силовые машины», ОАО «Северсталь», ЗАО «Ижорский трубный завод», ОАО «Челябинский трубопрокатный завод», ОАО «Выксунский металлургический завод» и многие другие. Кроме того, университет проводит совместные научные работы со своими стратегическими партнерами — лидерами среди научно-исследовательских организаций: Физико-техническим институтом имени А.Ф. Иоффе РАН, ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», ОАО «ЦНИИ технологии судостроения», ФГУП «НИИ электрофизической аппаратуры имени Д.В. Ефремова», ОАО «ЦКТИ им. И.И. Ползунова», РФЯЦ «ВНИИЭФ» и др. Созданы совместно с отраслевыми НИИ и промышленными предприятиями две базовые кафедры по направлению «Металлургия и материаловедение», на которых обучаются целевые студенты, ориентированные на дальнейшую деятельность

на конкретных предприятиях. Активно сотрудничает университет и с зарубежными корпорациями, например General Motors, Siemens, BP Exploration, Schlumberger, Weatherford, и, конечно, с десятками ведущих зарубежных университетов.

Результатом выполнения Инновационной образовательной программы (2008–2009 гг.), Программы развития НИУ (2010–2019 гг.) и Программы «5–100–2020» (реализация «дорожной карты» Программы начата в 2013 году) будет современная инновационная инфраструктура для проведения научных исследований, развития и коммерциализации технологий мирового уровня. В 2014 году на территории университета завершено строительство научно-исследовательского корпуса общей площадью 26 000 м², в котором в ближайшее время будут размещены все современные и передовые научно-образовательные, научно-исследовательские и научно-инновационные подразделения СПбГПУ, а также высокотехнологичные малые инновационные предприятия, созданные с участием университета.

В настоящее время в отделениях металлургии и машиностроения института металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ, участвуют в научной и педагогической деятельности члены-корреспонденты РАН А.И. Рудской, В.А. Лопота, М.В. Сильников, В.В. Рыбин, 95 докторов наук и 207 кандидатов наук. Обучаются 617 студентов по направлениям подготовки «Материаловедение и технология материалов» и «Металлургия» (ФГОС 150100 и 150400) и 38 докторантов и аспирантов (по специальности 05.16.00 — Металлургия).

Санкт-Петербургский политехнический университет способен решать многие комплексные научно-технические задачи — от идеи до создания передовых технологий и инновационных продуктов. Современный интеллектуальный и материально-технологический потенциал НИУ СПбГПУ позволяет политехникам проводить на высоком уровне фундаментальные и прикладные исследования по широкому спектру актуальных научных направлений, своевременно решать задачи отечественной и зарубежной высокотехнологичной промышленности, готовить для различных отраслей отечественной экономики компетентных спе-

циалистов, обладающих современными научно-технологическими знаниями, умениями и навыками эффективного применения передовых технологий и оборудования в различных от-

раслях науки и производства с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики и формирования «инновационной экономики знаний».

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

РУДСКОЙ Андрей Иванович — член-корреспондент РАН доктор технических наук профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: rector@spbstu.ru

AUTHOR

RUDSKOY Andrey I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: rector@spbstu.ru



УДК 378.1

*Ю.С. Васильев***ПОЛИТЕХНИКИ В СОВЕТЕ РЕКТОРОВ ВУЗОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА***Yu.S. Vasiliev***ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY ALUMNI****IN THE COUNCIL OF RECTORS OF ST. PETERSBURG UNIVERSITIES**

Статья посвящена деятельности Совета ректоров вузов Санкт-Петербурга, созданного в 1973 году. В ней отражено участие ректоров Политехнического института (затем университета) либо их представителей в работе Совета ректоров города и его комиссиях.

ИНСТИТУТ; ПОЛИТЕХНИКИ; УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС; НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ; СОВЕТ РЕКТОРОВ; САНКТ-ПЕТЕРБУРГ; УНИВЕРСИТЕТЫ.

Article is devoted to the activities of the Council of Rectors of St. Petersburg, founded in 1973. It is reflected the participation of Rectors of the Polytechnic Institute, and then in the work of of the Council of of the University of Rectors the city and its commissions.

INSTITUTE; POLYTECHNICS; STUDY PROCESS; SCIENCE RESEARCH; COUNCIL OF RECTORS; ST PETERSBURG; UNIVERSITIES.

В 2013 года исполнилось 40 лет деятельности Совета ректоров вузов Санкт-Петербурга (Ленинграда). Членом Совета ректоров города я стал в июне 1983 года после назначения на должность ректора Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина. К этому моменту Совет ректоров вузов города уже был одним из органов управления высшими учебными заведениями, и его персональный состав утверждался приказами министра высшего образования СССР. На коллегиях министерства рассматривались отчеты о деятельности Советов ректоров различных городов и регионов. Изучался, обобщался и получал распространение передовой опыт в различных сферах учебно-методической, научно-исследовательской и воспитательной работы вузов страны. Решения, принимаемые на пленарных заседаниях Совета ректоров и его президиума, были обязательными для высших учебных заведений города.

ЛПИ им. М.И. Калинина наряду с Университетом им. А.А. Жданова и Электротехническим институтом им. В.И. Ульянова (Ленина) сыграл существенную роль на этапе формирования и становления Совета ректоров.

Первый состав президиума и организационная структура Совета ректоров были утверждены 26 сентября 1973 года и объявлены на расширенном пленарном заседании, которое проводилось в Актовом зале Политехнического института. На базе ЛПИ формировались такие структуры из числа основных, как Совет по техническим наукам, а затем Совет по научной работе и Учебно-методический совет.

У истоков создания Совета ректоров стояли многие политехники, но особо выделю Константина Павловича Селезнева, ректора вуза с 1973-го по 1983 год, активного участника Великой Отечественной войны, известного ученого в области компрессоростроения. Константин Павлович возглавил Совет по техническим наукам, а затем и общий Совет по научной работе. В первый год работы Совета по техническим наукам в поле его зрения находились вопросы совершенствования научно-исследовательской работы (НИР) в вузах, эффективности деятельности проблемных и отраслевых научно-исследовательских лабораторий и установления прямых контактов между научными коллективами вузов и промышленными предприятиями. Возглавляя

Совет по науке, на протяжении всего своего ректорского периода К.П. Селезнев был заместителем председателя Совета ректоров.

В 70—80-е годы XX века в комиссиях и секциях Совета ректоров работала целая плеяда ярких, талантливых ученых и преподавателей Политехнического института: Ю.И. Уханов (Совет по техническим наукам), В.Р. Окорочков и Г.В. Симаков (секция научно-методического обеспечения учебного процесса в Учебно-методическом совете), В.Н. Боронин (Комиссия по проблемам подготовки специалистов для зарубежных стран), В.М. Николаев и А.К. Григорьев (секция по прикладным исследованиям и координации деятельности проблемных и отраслевых лабораторий в Совете по научной работе), В.А. Коноваленко (Комиссия по координации деятельности подготовительных отделений в Совете по контролю за приемом в вузы), С.М. Устинов (Комиссия по жилищно-бытовым проблемам в Совете по контролю за деятельностью в студенческих общежитиях). Особо подчеркнем имя Сергея Георгиевича Лагушкина, в те годы инструктора и заведующего сектором Отдела науки и учебных заведений обкома КПСС, принимавшего активное участие в работе президиума Совета ректоров на протяжении 9 лет. В настоящее время он — доцент кафедры истории нашего университета, заместитель ученого секретаря Санкт-Петербургского отделения МАН ВШ — Международной академии наук высшей школы.

В работе Совета ректоров принимали участие не только руководители института. Деканы ведущих факультетов, многие заведующие кафедрами включались в состав временных групп, готовивших вопросы для обсуждения на пленарных заседаниях и заседаниях президиума Совета ректоров. В качестве примера приведу названия нескольких вопросов, рассмотренных на пленарных заседаниях Совета ректоров, в подготовке которых принимали участие представители Политехнического института:

сентябрь 1973 года — «Задачи Совета ректоров по реализации Постановления Секретариата ЦК КПСС по отчету парткома Политехнического института им. М.И. Калинина»;

май 1974 года — «О дальнейшем повышении эффективности научно-исследовательской деятельности в вузах Ленинграда»;

май 1982 года — «Об эффективности использования научного потенциала вузов Ленинграда в решении важных народнохозяйственных задач»;

март 1984 года — «О развитии и укреплении творческих связей высшей школы города и Ленинградского научного центра АН СССР»;

апрель 1986 года — «Задачи вузов по повышению качества подготовки специалистов на основе интенсификации учебного процесса, углубления связи с производством, совершенствования научно-исследовательской работы».

К 1977 году в Политехническом институте был накоплен трехлетний опыт работы по долгосрочному комплексному договору с электромашиностроительным объединением «Электросила». На основе двухстороннего договора была проделана значительная работа по развитию конкретных форм, методов творческого сотрудничества вузовской науки с производством, концентрации сил ученых и производственников на решении крупных научно-технических проблем. В их числе были: создание крупных машин постоянного тока, новых электроизоляционных материалов, совершенствование организации и управления производством. К середине 80-х годов прошлого века 28 вузов города имели около тысячи долговременных двухсторонних договоров с предприятиями; они включали в себя не только решение научно-технических задач, но и подготовку кадров. Кстати, цифра 28 в свое время была очень известна в кругах энергетиков. «Договор-28» — это комплексный договор создателей Саяно-Шушенской ГЭС, достойный образец сотрудничества проектных, конструкторских, строительных организаций и вузов. Изучение и обобщение этого опыта, подготовка рекомендаций Советом ректоров и Учебно-методическим советом позволили вузам и их партнерам перейти на качественно новую ступень интеграции — приступить к созданию учебно-научно-производственных комплексов и объединений.

В середине 80-х годов Совет ректоров поручил мне возглавить Учебно-методический совет, в котором, кстати говоря, работали тогда проректор, а в настоящее время президент Санкт-Петербургского государственного университета Людмила Алексеевна Вербицкая и многие другие известные руководители вузов города. В этот период происходит некоторая корректировка тре-

бований промышленности к выпускникам вузов, особенно технических. Их суть заключалась в том, что, наряду с общими для всех отраслей направлениями интенсификации производства, в каждой отрасли существовала своя специфика. Промышленность нуждалась в целевой подготовке инженерных кадров, сочетающих высокий уровень фундаментального и общетехнического образования с глубокими знаниями конкретной отрасли, обладающих высокой мобильностью при разработке и освоении принципиально новых технических решений. Опыт создания учебно-научно-производственных комплексов, продиктованный социальным заказом реального производства, получил дальнейшее развитие в виде целевой интенсивной подготовки специалистов (ЦИПС). Обеспечение решения этой задачи стало одним из главных дел Совета по учебно-методической работе. В выработке концепции активное участие принимали профессор В.Н. Бусурин, В.В. Глухов, В.Н. Козлов и Э.М. Шмаков.

Целевая — поскольку подготовка инженеров велась конкретно в интересах базовых предприятий и на кооперативных с ними началах. Интенсивная — ибо в рамках традиционной учебной программы предполагалось сформировать у студента качественно иной, действительно творческий подход к организации инженерного труда, обучить методам и средствам его рационального и эффективного построения с использованием новейших технических средств. И сегодня это направление в деятельности вузов не теряет своей актуальности. Правда, термины несколько иные — практико-ориентированная подготовка. А тогда, во второй половине 80-х, нами были получены первые результаты «модульного» распределения, при котором заказчик стал получать уже не одиночек, а группу специалистов со сложившимися профессиональными и товарищескими связями. В 1985 году Политехнический институт распределил на Ижорский завод 32 человека по семи специальностям. В 1988 году Институт авиационного приборостроения распределил кадровый модуль в НТО АН СССР. Здесь же родилась идея межвузовского модуля с участием трех институтов: Политехнического, Электротехнического и Авиаприборостроения. С этого года высшие технические вузы города в основном перешли на

распределение выпускников по прямым связям на основе комплексных договоров. Нашими партнерами были Кировский, Невский, Ижорский и Металлический заводы, НТО и ФТИ АН СССР, большое число проектных организаций. В конце концов нам удалось продвинуть эту работу на уровень связи «вуз — министерство».

Второй момент — это повышение авторитета подготовки инженеров. Еще в 1975 году Ленинградский политехнический институт был принят в Международную ассоциацию университетов.

Внимание Совета ректоров к вопросам международной деятельности вузов определялось тем обстоятельством, что многие вузы города осуществляли на протяжении не одного десятка лет подготовку кадров для зарубежных стран и развивали международные научно-технические связи. Эта деятельность Совета ректоров проводилась на основе взаимодействия с Комитетом по внешним связям и Комитетом по науке и высшей школе.

Такая тесная координация была особенно необходима в период, когда с 1990 года практически полностью сократился прием иностранных граждан в вузы города за счет государственного бюджета, но одновременно вузам было разрешено самостоятельно принимать на обучение иностранных граждан с частичной компенсацией затрат. Это требовало разработки необходимой нормативной документации и пересмотра организационной системы работы с иностранным контингентом. СПбГПУ одним из первых среди вузов справился с этой непростой задачей, и разработанная им документация была принята в качестве типовой для других вузов. В этом большая заслуга профессоров В.Н. Боронина, Г.Д. Арсеньева, В.В. Кораблева.

Понимая важность сохранения всей системы организации подготовки специалистов для зарубежных стран, Правительство РФ своим постановлением от 12.10.1995 г. № 1003 образовало Межведомственную комиссию по международному партнерству в области образования, в состав которой был включен Президент СПбГПУ. Работа комиссии сыграла большую координирующую роль в процессе принятия решений отдельными министерствами и ведомствами, занимающимися международной деятельностью в сфере образования.

Следует отметить, что в эти годы в связи с изменившимися экономическими и политическими условиями большую помощь вузам оказал городской Совет по делам иностранных учащихся, а также Ассоциация проректоров по международным связям, являющаяся секцией Совета ректоров вузов города.

Принципы целевой подготовки специалистов, но несколько в другой трактовке имели место и в системе обучения иностранных граждан.

В частности, в СПбГПУ главные принципы, положенные в основу образовательных программ для иностранных учащихся, заключались в учете как специфических особенностей общеобразовательной довузовской подготовки, так и условий будущей трудовой деятельности выпускников. Такая целенаправленная подготовка иностранных специалистов для стран различных регионов (КНР, Алжир, Куба, Гвинея, Индия, Сирия и др.) в решающей степени способствовала тому, что многие выпускники по возвращении на родину занимали ведущие позиции в общественно-политической, экономической и культурной жизни своих стран, что позволяло развивать плодотворные связи с нашей страной, университетом.

Целевая форма подготовки выпускников была призвана решать и еще одну важную задачу — обеспечение условий успешного адаптации зарубежных специалистов к реальным условиям трудовой деятельности на объектах, которые сооружались в ряде стран и оснащались оборудованием, поставляемым нашей страной. Такие объекты в области энергетики, гидротехники, металлургии сооружались в Египте, Индии, КНР, Сирии, Гвинеи, Алжире и других странах.

Развитию целевых форм подготовки иностранных специалистов в большой степени способствовало командирование ведущих преподавателей университета в зарубежные учебные и научные центры для чтения лекций, оказания консультационной помощи в решении научно-технических задач. Эта деятельность в определенной степени способствовала развитию научных школ, основы которых формировались в ряде зарубежных стран с участием ученых СПбГПУ.

Большую роль в решении задач подготовки национальных кадров сыграли созданные в ряде стран подготовительные факультеты, где орга-

низация учебного процесса была возложена на СПбГПУ.

В восьмидесятые годы СПбГПУ и ряд вузов города включился в реализацию комплексной программы стран-членов СЭВ в части подготовки квалифицированных инженерных и научных кадров по приоритетным направлениям в области электронизации, комплексной автоматизации, атомной энергетики, новых материалов, технологий их производства и обработки. В этот период происходил интенсивный обмен студенческими группами на безвалютной основе со странами Восточной Европы.

Все указанные формы организации учебного процесса с иностранными учащимися, научно-технические связи с зарубежными вузами и организациями находили отражение в деятельности комиссий и секций Совета ректоров вузов города.

Предвидя перспективы развития высшего технического образования, мы с коллегами из МВТУ им. Н.Э. Баумана, Томского и Челябинского политехнических институтов разработали концепцию технического университетского образования. В нашем городе сподвижником в этом деле выступил Дмитрий Михайлович Ростовцев, ректор Кораблестроительного института. Разработанная методика экспертизы вузов, претендовавших на присвоение статуса технического университета, критерии отбора и многое другое помогли создать модель объективной оценки вузов и упрочили уважение к ленинградской высшей инженерной школе. В результате с 1990 года Политехнический и Кораблестроительный институты одними из первых среди вузов России повысили свой статус и стали называться Государственными техническими университетами. Это стало основой для широкого развития технического университетского образования в стране и привело к созданию Ассоциации технических университетов.

В контексте рассматриваемой темы необходимо выделить и еще один аспект — связь высшей школы с наукой. Мы до сих пор условно делим науку на отраслевую, вузовскую и академическую. Связь с отраслью позволяла нам решать конкретные, реальные задачи, внедрять результаты исследований. Связь с академической наукой позволяла и позволяет сейчас работать на задел, на перспективу. Значительную

роль в этом деле играли региональный Межведомственный координационный совет (МКС) АН СССР (1979 г.) и Ленинградский научный центр тогда Академии наук СССР во главе с Героем Социалистического труда академиком Игорем Алексеевичем Глебовым.

Президиум Академии наук СССР на протяжении многих лет достаточно внимательно и заинтересованно относился к научным исследованиям и уровню подготовки специалистов в Политехническом университете. На заседании Президиума Российской академии наук в марте 2009 года было заслушано наше с М.П. Федоровым, тогда членом-корреспондентом, а ныне академиком РАН, сообщение «Научные школы Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (интеграция фундаментальных исследований и образования)».

Сегодня трудно представить работу Совета ректоров вузов города без участия Политехнического университета, его руководства и многих политехников, болеющих за будущее отечественной высшей школы. В 1991 году из органа управления вузами Совет ректоров был преобразован в Региональную общественную организацию «Совет ректоров вузов Санкт-Петербурга».

С 2004 года председателем Совета ректоров Санкт-Петербурга является член-корреспондент РАН, академик РАО профессор Владимир Николаевич Васильев, ректор Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; он с 2006 года — вице-президент Российского союза ректоров (кстати, выпускник и почетный профессор СПбГПУ).

В 2011 году в Президиум Совета ректоров избран член-корреспондент РАН профессор Андрей Иванович Рудской — ректор СПбГПУ. По его поручению проректоры и директора институтов выполняют важные для Совета ректоров поручения.

В составе Совета ректоров образован Совет президентов вузов, который в настоящее время под руководством почетного профессора СПбГПУ президента Санкт-Петербургского университета технологии и дизайна Виктора Егоровича Романова сосредоточил свое внимание на законодательской работе для представительных органов России и Санкт-Петербурга.

В заключение приведу выдержку из Устава Совета ректоров Санкт-Петербурга:

...Основными целями деятельности региональной общественной организации «Совет ректоров вузов Санкт-Петербурга» являются консолидация усилий и координация взаимодействия ректоров высших учебных заведений Санкт-Петербурга по следующим направлениям:

развитие системы высшего и послевузовского образования Российской Федерации, преобразование данной сферы общественной деятельности в реальную производительную силу, содействующую становлению устойчивого, инновационно-ориентированного, социального государства, формированию экономики, основанной на знаниях;

сохранение и развитие традиций и базовых принципов отечественной системы образования — качества, доступности, академических свобод;

развитие и укрепление связей с национальными, зарубежными и международными образовательными, научными и культурными организациями и учреждениями для распространения фундаментальных знаний, обмена достижениями и передовыми технологиями, культурными ценностями, формирования глобального научно-образовательного, гуманитарного пространства как одного из важнейших условий сближения народов, взаимного обогащения национальных культур;

улучшение социальной защищенности обучающихся и работников сферы образования; укрепление социального и правового статуса ректорского сообщества, повышение его авторитета;

развитие системы социального партнерства высших учебных заведений, иных образовательных организаций, государственных структур, научных организаций, бизнес-сообщества, профсоюзных организаций и иных институтов научно-образовательного сообщества;

содействие практической реализации образовательных, научных, инновационных, культурных и иных общенациональных программ и приоритетных проектов;

содействие практической реализации программ интеграции образования с научной и инновационно-ориентированной производственной деятельностью, развитие фундаментальных и прикладных научных исследований в высших учебных заведениях;

совершенствование нормативной правовой базы, регулирующей отношения в области образования и науки.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — академик РАН доктор технических наук профессор президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: president@spbstu.ru

AUTHOR

VASILIEV Yuriy S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: president@spbstu.ru



УДК 001:92

А.Г. Морачевский

**ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ МЕНДЕЛЕЕВ
И ЕГО НАУЧНЫЕ СВЯЗИ
С ПРОФЕССОРАМИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
(к 180-летию со дня рождения Д.И. Менделеева)**

A.G. Morachevsky

**DMITRI I. MENDELEEV AND HIS SCIENTIFIC CONNECTIONS
WITH THE PROFESSORS OF THE POLYTECHNIC INSTITUTE
(THE 180TH ANNIVERSARY D.I. MENDELEEV)**

В очерке приводятся краткие биографические сведения о великом русском химике Д.И. Менделееве (1834–1907) и обсуждаются его научные связи с профессорами Петербургского политехнического института — Н.А. Меншуткиным, А.А. Байковым, В.А. Кистяковским, П.П. Федотьевым, Б.Н. Меншуткиным.

ОЧЕРК; БИОГРАФИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ; ВЕЛИКИЙ РУССКИЙ ХИМИК Д.И. МЕНДЕЛЕЕВ; НАУЧНЫЕ СВЯЗИ; ПРОФЕССОР; ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ.

In an essay provides brief biographical information about the great Russian chemist D.I. Mendeleev (1834–1907) and discusses its scientific relations with professors Petersburg Polytechnic Institute — N.A. Menshutkin, A.A. Baikov, V.A. Kistyakovskii, P.P. Fedot'ev, B.N. Menshutkin.

ESSAY; BIOGRAPHICAL INFORMATION; THE GREAT RUSSIAN CHEMIST D.I. MENDELEEV; SCIENTIFIC COMMUNICATIONS; PROFESSOR; ST. PETERSBURG POLYTECHNIC INSTITUTE.

Профессора-химики Петербургского политехнического института Н.А. Меншуткин, Н.С. Курнаков, А.А. Байков, В.А. Кистяковский, П.П. Федотьев, Б.Н. Меншуткин в разной степени, но все имели научные связи с Д.И. Менделеевым. Прежде чем их рассматривать, очень кратко напомним основные даты жизни великого русского ученого.

Дмитрий Иванович Менделеев родился 27 января (8 февраля) 1834 года в г. Тобольске, был семнадцатым ребенком в семье преподавателя словесности и директора Тобольской гимназии Ивана Павловича Менделеева (1783–1847). После окончания Тобольской гимназии в 1850 году Д.И. Менделеев поступил в Главный педагогический институт в Петербурге, где химию преподавал А.А. Воскресенский (1808–1880), оказавший огромное влияние на молодого Менделеева. Особенно внимательно он записывал лекции своего учителя по неоргани-

ческой химии. В 1855 году Д.И. Менделеев закончил институт с золотой медалью и званием старшего учителя. Уже в апреле 1856 года он сдал магистерские экзамены на физико-математическом факультете Петербургского университета, в сентябре того же года защитил магистерскую диссертацию на тему «Удельные объемы». В январе 1857 года Д.И. Менделеев был утвержден в звании приват-доцента Петербургского университета и осенью 1857 года начал читать курс органической химии. Одновременно, нуждаясь в заработке, он преподавал химию во Втором кадетском корпусе и в Михайловской артиллерийской академии, давал частные уроки.

В апреле 1859 года Д.И. Менделеев был направлен в научную командировку за границу. После поездки по научным центрам Франции и Германии он выбрал Гейдельберг (Германия), где работал в те годы Р. Бунзен (1811–1899), широко известный и разносторонний химик. Мен-

делеев устроил в Гейдельберге собственную небольшую лабораторию, закупил необходимые приборы и приступил к исследованиям по собственной программе. Преимущественно он занимался изучением физико-химических свойств жидкостей, природы жидкого состояния [1].

Сразу же по возвращении в феврале 1861 года в Россию Д.И. Менделеев получил заказ на написание учебника «Органическая химия» и очень быстро с ним справился. Книга была издана уже в конце того же года. В апреле 1862 года Академия наук присудила Д.И. Менделееву за эту книгу Демидовскую премию. В 1863 году вышло второе издание учебника.

В 1861–1864 годах Менделеев читал лекции по химии и заведовал химической лабораторией в Институте корпуса инженеров путей сообщения. В январе 1864 г. он был утвержден в должности профессора химии Технологического института и в должности штатного доцента Петербургского университета. 31 января 1865 года на заседании Совета физико-математического факультета Петербургского университета Д.И. Менделеев защитил докторскую диссертацию на тему «О соединении спирта с водой». В декабре 1865 года он был утвержден в должности ординарного профессора Петербургского университета по кафедре технической химии, а в октябре 1867 года переведен на кафедру общей химии в той же должности.

В 1867–1868 годах Д.И. Менделеев активно участвует в создании Русского химического общества (с 1876 года — Русское физико-химическое общество).

17 февраля (1 марта) 1869 года считается днем открытия периодического закона. В этот день утром Д.И. Менделеев сделал наброски первого сопоставления элементов различных групп по атомным весам и уже вечером отправил в типографию «Опыт системы элементов, основанный на их атомном весе и химическом сходстве». 6 марта на заседании Русского химического общества Н.А. Меншуткин от имени Д.И. Менделеева сделал сообщение об «Опыте системы элементов...». Предварительно отпечатанные в типографии листки с текстом сообщения были разосланы многим отечественным и зарубежным химикам.

2 февраля 1871 года была закончена публикация всех выпусков 1-го издания «Основ химии».

Работу над текстом этого фундаментального учебника Д.И. Менделеев начал в 1867–1868 учебном году, используя в процессе написания стенограммы своих лекций, составленные студентами. В последнем выпуске 1-го издания «Основ химии» в начале 1871 года была в окончательном виде приведена система элементов. Одновременно весьма интенсивной была и его педагогическая деятельность: в 1867–1871 годах она протекала в Университете, в Технологическом институте, на Высших женских (Бестужевских) курсах, в Николаевской инженерной академии.

В 1877 году вышло из печати третье издание «Основ химии» (второе издание мало отличалось от первого), в котором в более совершенном виде излагался периодический закон. Открытия учеными разных стран галлия (1875 г.), скандия (1879 г.), германия (1886 г.) подтвердили предсказательные возможности периодической системы элементов, явились триумфом открытия, сделанного Д.И. Менделеевым.

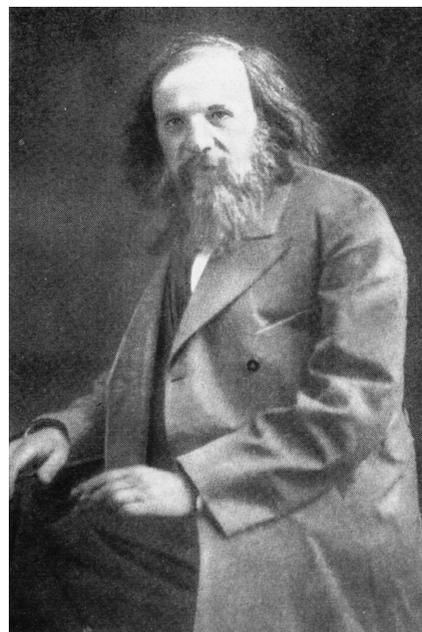
Весной 1880 года Д.И. Менделеев посетил южные районы страны, чтобы ознакомиться с нефтяными месторождениями, добычей нефти. Это послужило началом целого ряда исследований в области переработки нефти (1880–1883 гг.). В 1889 году вышло пятое издание «Основ химии», в которое автор внес существенные дополнения. Именно это издание получило распространение за границей, с него были сделаны переводы на английский, французский и немецкий языки.

В 1890 году Д.И. Менделеев прекратил педагогическую деятельность в Университете. Непосредственным поводом для этого был конфликт с министром народного просвещения графом И.Д. Деляновым. Еще раньше Д.И. Менделеев прекратил преподавание в других учебных заведениях. В 1890–1895 годах Менделеев — консультант Научно-технической лаборатории Морского министерства, где занимался разработкой технологии производства бездымного пороха. В 1891–1892 годах он принял активное участие в составлении Энциклопедического словаря по заказу издателей Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона и продолжал этим заниматься в последующие годы. В 1893 году ученый был назначен Управляющим Главной палатой мер и весов — метрологического центра России.

В 1895 году выходит из печати 6-е издание «Основ химии», а в 1902-м — 7-е издание. В оба издания автор внес дополнения в интересующие его разделы. В эти же годы Д.И. Менделеев уделяет большое внимание экономическим проблемам России, он неоднократно встречал с С.Ю. Витте и, особенно, с В.И. Ковалевским, готовил по их просьбам соответствующие записки. Еще в июле 1899 года Д.И. Менделеев с группой помощников совершил поездку на Урал, ознакомился с состоянием промышленных предприятий. В целом ряде публикаций суммируются идеи ученого, связанные с его общественно-политической, научной и экономической деятельностью.

Сам Д.И. Менделеев на склоне лет так оценивал результаты своей деятельности: «Всего более четыре предмета составили мое имя: периодический закон, исследование упругости газов, понимание растворов как ассоциации и «Основы химии». Тут все мое богатство. Оно не отнято у кого-нибудь, а произведено мною». И далее: ««Основы» — любимое дитя мое. В них — мой образ, мой опыт педагога и мои задушевные мысли...» [2]. При жизни ученого «Основы химии» переиздавались восемь раз, почти всегда с дополнениями автора, неоднократно переиздавались они и после его кончины, переводились за границу. На изучении «Основ химии» Д.И. Менделеева выросло не одно поколение русских и зарубежных химиков.

Дмитрий Иванович Менделеев скончался после непродолжительной болезни 20 января (1 февраля) 1907 года. На его похороны из разных городов России прибыли представители научной общественности, делегации от университетов, других учреждений. Научные заслуги Д.И. Менделеева были высоко оценены в России и мировым сообществом [1, 2]. Наиболее полную характеристику ученому дал профессор Л.А. Чугаев, один из крупнейших химиков России: «Гениальный химик, первоклассный физик, плодотворный исследователь в области гидродинамики, метеорологии, геологии, в различных отраслях химической технологии и других сопредельных с химией и физикой дисциплинах, глубокий знаток химической промышленности вообще, особенно русской, оригинальный мыслитель в области учения о народном хозяйстве» [2].



Д.И. Менделеев, 1887 г.

Сам Д.И. Менделеев писал: «Плоды моих трудов, прежде всего, — в научной известности, составляющей гордость — не одну мою личную, но и общую русскую, так как все главнейшие научные академии начиная с Лондонской, Римской, Бельгийской, Парижской и Бостонской избрали меня своим сочленом, как и многие ученые общества России, Западной Европы и Америки, всего более 50-ти обществ и учреждений» [2].

В сборнике [3] содержатся сведения о профессорах Политехнического института, имена которых перечислены в начале очерка.

Николай Александрович Меншуткин (1842–1907) — с 1902 года первый декан металлургического отделения Петербургского политехнического института и профессор аналитической и органической химии в нем, один из крупнейших российских химиков, окончил Петербургский университет в 1862 году и с того времени был знаком с Д.И. Менделеевым, работал с ним многие годы. При защите Н.А. Меншуткиным в марте 1866 года диссертации на степень магистра в Петербургском университете Д.И. Менделеев был одним из оппонентов. В январе 1868 года молодой Н.А. Меншуткин вместе с Д.И. Менделеевым и Н.Н. Зининым выступил с инициативой создания Русского химического

общества (РХО). Как уже выше упоминалось, 6 марта 1869 года Н.А. Меншуткин от имени Д.И. Менделеева сообщил на заседании РХО об открытии периодической зависимости элементов. В начале апреля того же года при защите Н.А. Меншуткиным докторской диссертации оппонентами были Д.И. Менделеев и А.М. Бутлеров. При избрании Н.А. Меншуткина на должность ординарного профессора в Петербургском университете записку об его ученых трудах готовили Д.И. Менделеев и А.М. Бутлеров.

В 1880 году, когда Д.И. Менделеев не был избран на вакантную должность действительно члена Императорской Академии наук (членом-корреспондентом он был с 1876 года), Н.А. Меншуткин выступил с резким заявлением по этому поводу: «Физико-химическое отделение Императорской Академии наук в заседании 11 ноября 1880 года забаллотировало Д.И. Менделеева, который был предложен в члены отделения на место покойного Н.Н. Зинина. Беспорность заслуг кандидата, которому равного русская наука представить не может, известность его за границей делают совершенно необъяснимым его забаллотирование. Ввиду повторяющихся неизбраний в Физико-химическое отделение Академии наук лучших русских ученых мы считаем нужным обратить на это общественное внимание» [4]. Будучи делопроизводителем Общества, Н.А. Меншуткин разослал это заявление для подписи всем иногородним членам Химического общества. Практически все члены Химического общества согласились с заявлением, подписали его. На ближайшем, декабрьском (1880 г.) заседании Химического общества Д.И. Менделеев был избран его почетным членом и ему был поднесен приветственный адрес.

Когда в семидесятые-восьмидесятые годы XIX века заходила речь о блестящем преподавательском составе Естественного отделения Физико-математического факультета Петербургского университета, то, как правило, первой называлась фамилия Д.И. Менделеева, второй — Н.А. Меншуткина, далее шли фамилии известных биологов, геологов и т. д.

Д.И. Менделеев любил и понимал живопись. На традиционные «Менделеевские среды» у него собирались многие художники, его друзья: И.Н. Крамской, И.Е. Репин, И.И. Шишкин, А.И. Куинджи, Н.А. Ярошенко и другие. Из чис-

ла профессоров Университета на средах чаще всего бывали А.Н. Бекетов и Н.А. Меншуткин.

Д.И. Менделеев и Н.А. Меншуткин ушли из жизни почти в одно время — 20 и 23 января 1907 года. Российская химическая наука понесла невосполнимые утраты.

Николай Семенович Курнаков (1860—1941, академик с 1913 г.) — выпускник Горного института, профессор Политехнического института с 1902 по 1930 год, оставил о Д.И. Менделееве очень теплые воспоминания: «Мне приходилось встречаться с Менделеевым на заседаниях Химического общества, и я вынес о нем самое глубокое впечатление. Это один из самых великих, выдающихся ученых людей, которых я встречал на своем веку. Личность в высшей степени замечательная и как профессор, и как лектор, и как ученый-общественник. Менделеев и по внешнему виду... поражал своей титанической фигурой» [5].

В личной библиотеке Д.И. Менделеева имеются многие работы Н.С. Курнакова, подаренные автором. В 5-м (1889 г.) и последующих изданиях «Основ химии» есть ссылки на работы Н.С. Курнакова, относящиеся к химии комплексных соединений и к металлическим сплавам.

В 1934 году академик Н.С. Курнаков возглавил Оргкомитет по подготовке и проведению юбилейного Менделеевского съезда в ознаменование 100-летия со дня рождения Д.И. Менделеева. Съезд проходил в Ленинграде с 10 по 13 сентября 1934 года с большим участием иностранных делегаций. Во вступительном слове Н.С. Курнаков подчеркнул, что «...титаническая фигура Д.И. Менделеева предстает перед нами во всем величии как в прошлом, так и, в особенности, для научной работы настоящего». Значительным вкладом в развитие теории физико-химического анализа стал доклад Н.С. Курнакова на этом съезде «Особые точки учения о растворах Д.И. Менделеева и топология химической диаграммы».

Александр Александрович Байков (1870—1946, академик с 1932 г.) — профессор Политехнического института с 1902 до конца жизни, также оставил воспоминания о своих встречах с Д.И. Менделеевым. А.А. Байков в 1889 году поступил на физико-математический факультет Петербургского университета, и первой в его

жизни лекцией, которую он услышал, была лекция Д.И. Менделеева по неорганической химии. В воспоминаниях А.А. Байкова говорится: «... в 1889 году имя Менделеева уже пользовалось мировой известностью, но в Петербургском университете оно было предметом совершенно исключительного почитания среди профессоров и особенно среди студентов» [5]. А.А. Байков был также на последней лекции Д.И. Менделеева в Университете 22 марта 1890 года, в своих воспоминаниях он подробно описывает события, которые стали причиной отставки Д.И. Менделеева.

Первая длительная личная встреча А.А. Байкова с Д.И. Менделеевым состоялась в начале 1902 года, когда готовилось 7-е издание «Основ химии» и Менделеев решил включить в него раздел о сплавах. Беседа началась со слов Д.И. Менделеева: «... в изучении сплавов я нахожу много прекрасных сторон». В 7-м издании есть ссылки на работы А.А. Байкова. Кроме того, Д.И. Менделеев привлек А.А. Байкова к написанию ряда статей для «Энциклопедического словаря», редактором химико-технического отдела в котором был Менделеев.

На упоминавшемся выше юбилейном Менделеевском съезде академик А.А. Байков выступил с большим докладом «Значение Д.И. Менделеева в химии». Уже после кончины А.А. Байкова вышла из печати его статья «Периодический закон Д.И. Менделеева и его творец» [6].

Владимир Александрович Кистяковский (1865–1952, академик с 1929 г.) — профессор физической химии и теоретической электрохимии, преподавал в Политехническом институте с 1902 по 1918 год и с 1922 по 1934 год. Окончил в январе 1889 года естественное отделение физико-математического факультета Петербургского университета со степенью кандидата, слушал лекции Д.И. Менделеева, был с ним хорошо знаком.

В своих воспоминаниях В.А. Кистяковский, в частности, пишет: «Дмитрий Иванович безгранично любил науку, жил ею. Должно быть, это было в 1887 или 1889 году, когда я еще работал в бывшей бутлеровской лаборатории, я помню, как среди ночи Менделеев проходил из своей квартиры, примыкавшей к лаборатории, в свой лабораторный кабинет, чтобы поставить какой-либо новый опыт или посмотреть на ре-

зультаты поставленного раньше опыта...» [5]. В.А. Кистяковский встречался с Д.И. Менделеевым неоднократно, был одним из партнеров его по игре в шахматы.

Следует отметить, однако, что их взгляды на природу растворов электролитов существенно различались. В.А. Кистяковский, еще будучи студентом старших курсов, проявил большой интерес к идеям С. Аррениуса и В. Оствальда (оба в разные годы получили Нобелевские премии), написал на эту тему дипломную работу, по окончании Университета стажировался в лаборатории Оствальда в Лейпциге (Германия). В то же время Д.И. Менделеев еще в 1889 году выступил против модели Аррениуса и не изменил своих взглядов относительно диссоциации электролитов до конца жизни. Д.И. Менделееву казалось, что теория Аррениуса находится в непримиримом противоречии с его взглядами на природу растворов. Б.П. Никольский (1900–1990, академик с 1968 г.) в своем обзоре «Работы русских химиков по теории растворов» [7] характеризовал взгляды Д.И. Менделеева как «... ошибки гения. Они имели и свою положительную сторону, вызвав ряд новых полезных исследований и заставив русских ученых с большей осторожностью относиться к различным теоретическим построениям в области растворов...». В.А. Кистяковский многое сделал для сближения позиций Д.И. Менделеева и С. Аррениуса. Все это подробно анализируется в работе [8].

Павел Павлович Федотьев (1864–1934, член-корр. АН СССР с 1933 г.) — профессор минеральной технологии и технической электрохимии в Политехническом институте с 1904 по 1934 год. В 1896–1902 годах опубликовал целый ряд книг по актуальным вопросам химической технологии, в том числе два издания книги «Современное состояние химической промышленности в России» (1897 и 1902 гг.). На этой основе состоялось его знакомство с Д.И. Менделеевым. Перед заграничной командировкой П.П. Федотьева в Западную Европу (1906 г.) Д.И. Менделеев снабдил его рекомендательными письмами к коллегам и промышленникам [9].

Борис Николаевич Менишуткин (1874–1938) — доктор химических наук, профессор аналитической и органической химии. Преподавал в Политехническом институте с 1902 по 1938 год. Известный историк химии. С Д.И. Менделеевым

был знаком с детских лет. Б.Н. Меншуткин впервые собрал в одном издании на русском языке все работы Д.И. Менделеева, относящиеся к периодическому закону и опубликованные в свое время в различных журналах на разных языках, трудно доступных широкому читателю, проследил все изменения и дополнения, которые вносил Д.И. Менделеев в прижизненные издания «Основ химии», добавил в сборник большую статью с жизнеописанием Д.И. Менделеева (1926 г.). В дальнейшем к этой тематике Б.Н. Меншуткин

возвращался неоднократно. Более подробные сведения содержатся в работе [10].

21 января 1904 года Д.И. Менделеев был избран почетным членом Петербургского политехнического института.

Очерк написан по инициативе и при участии председателя Комиссии по культурному наследию и истории Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, президента СПбГПУ академика РАН Юрия Сергеевича Васильева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Летопись жизни и деятельности Д.И. Менделеева / Р.Б. Добротин, Я.Г. Карпило, Л.С. Керова, Д.Н.Трифонов. Отв. ред. проф. А.В. Сторонкин. Л.: Наука, 1984. 531 с.
2. Макареня А.А. Д.И. Менделеев и физико-химические науки. Опыт научной биографии Д.И. Менделеева. М.: Атомиздат, 1972. 256 с.
3. Морачевский А.Г. Химия и химики в Политехническом институте. Санкт-Петербург, Петроград, Ленинград. 1902–1930 гг. / Под ред. акад. РАН Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 288 с.
4. Меншуткин Б.Н. Жизнь и деятельность Николая Александровича Меншуткина. СПб.: Типограф. М. Фроловой, 1908. 376 с.
5. Д.И. Менделеев в воспоминаниях современников / Сост. А.А. Макареня, И.Н. Филимонова. М.:

- Атомиздат, 1969. 224 с.
6. Байков А.А. 75 лет периодического закона Д.И. Менделеева и Русского химического общества. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. С. 17–30.
7. Никольский Б.П. Работа русских химиков по теории растворов // Вестник Ленингр. ун-та. 1946. № 1. С. 67–80.
8. Морачевский А.Г. Академик Владимир Александрович Кистяковский. Жизнь и деятельность / Под ред. акад. РАН Ю.С.Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 90 с.
9. Морачевский А.Г. Профессор Павел Павлович Федотьев и его научная школа / Под ред. акад. РАН Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 89 с.
10. Морачевский А.Г. Отец и сын Меншуткины / Под ред. акад. РАН Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 123 с.

REFERENCES

1. Letopis zhizni i deyatelnosti D.I. Mendeleeva / R.B. Dobrotin, Ya.G. Karpilo, L.S. Kerova, D.N.Trifonov. Отв. ред. проф. А.В. Сторонкин. L.: Nauka, 1984.— 531 s. (rus.)
2. Makarenya A.A. D.I. Mendeleev i fiziko-khimicheskiye nauki. Opyt nauchnoy biografii D.I. Mendeleeva. M.: Atomizdat, 1972. 256 s. (rus.)
3. Morachevskiy A.G. Khimiya i khimiki v Politekhnicheskom institute. Sankt-Peterburg, Petrograd, Leningrad. 1902–1930 gg. / Pod red. akad. RAN Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 288 s. (rus.)
4. Menshutkin B.N. Zhizn i deyatelnost Nikolaya Aleksandrovicha Menshutkina. SPb.: Tipogr. M. Frolovoy, 1908. 376 s. (rus.)
5. D.I. Mendeleev v vospominaniyakh sovremennikov / Sost. A.A. Makarenya, I.N. Filimonova. M.: Atomizdat, 1969. 224 s. (rus.)

6. Baykov A.A. 75 let periodicheskogo zakona D.I. Mendeleeva i Russkogo khimicheskogo obshchestva. M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1947. S.17–30. (rus.)
7. Nikolskiy B.P. Rabota russkikh khimikov po teorii rastvorov. Vestnik Leningr. un-ta. 1946. № 1. S. 67–80. (rus.)
8. Morachevskiy A.G. Akademik Vladimir Aleksandrovich Kistyakovskiy. Zhizn i deyatelnost / Pod red. akad. RAN Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. 90 s. (rus.)
9. Morachevskiy A.G. Professor Pavel Pavlovich Fedotyev i yego nauchnaya shkola / Pod red. akad. RAN Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. — 89 s. (rus.)
10. Morachevskiy A.G. Otets i syn Menshutkiны / Pod red. akad. RAN Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 123 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МОРACHEВСКИЙ Андрей Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры физико-химии и технологий микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, заслуженный деятель науки и техники РФ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: andrey.morachevsky@gmail.com

AUTHOR

MORACHEVSKY Andrey G. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: andrey.morachevsky@gmail.com

УДК 629.1.032.001

*Ю.В. Галышев, Р.Ю. Добрецов,
Г.П. Поршневу, С.И. Худорожков*

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ УЧЕНЫХ СПбПУ
В ОБЛАСТИ ОБОРОННОЙ ТЕХНИКИ
(по материалам IX-й международной выставки вооружения,
военной техники и боеприпасов)**

*Yu.V. Galishev, R.Yu. Dobretsov,
G.P.Porshnev, S.I. Hoodorozhkov*

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF SPBSPU SCIENTISTS
IN DEFENSE TECHNIQUE
(based on the IX international exhibition of arms, military equipment
and ammunition)**

В статье аннотированы актуальные темы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, представленных на выставке «RAE-2013» кафедрой двигателей, автомобилей и гусеничных машин института энергетики и транспортных систем СПбПУ. Кратко охарактеризована деятельность этой кафедры в современном и историческом аспектах, показана ее роль в становлении и развитии транспортного машиностроения в СССР и России.

RAE-2013; РОССИЙСКАЯ ВЫСТАВКА ОРУЖИЯ; КОЛЕСНЫЕ И ГУСЕНИЧНЫЕ МАШИНЫ; ТЕМЫ ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК; ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ.

In the article, the relevant topics of the scientific research and research and development work that was presented at the «RAE-2103» by the «Engines, automobiles and tracked vehicles» department of the Institute of Energy and transport systems.

RAE-2013; RUSSIAN WEAPON EXHIBITION; WHEELED AND TRACKED VEHICLES; TOPICS OF INNOVATIVE SOLUTIONS; TRANSPORT MACHINE BUILDING.

Девятая международная выставка вооружений, военной техники и боеприпасов — «Российская выставка вооружения. Нижний Тагил-2013» («Russian Arms Expo-2013») — проходила с 25 по 28 сентября. Рост авторитета этого мероприятия и усиление внимания Правительства Российской Федерации к сектору вооружений и военной техники не только как к высокодоходной отрасли машиностроения, но и области, жизненно важной для обеспечения стабильности существования страны и защиты ее интересов, делает участие в ней престижным для предприятий военно-промышленного комплекса и вузов России и зарубежья.

В области проектирования специальных (боевые, разведывательные, военно-транспортные) наземных колесных и гусеничных машин, дви-

гателей и силовых установок военной и гражданской техники Санкт-Петербургский государственный политехнический университет занимает серьезные позиции, опираясь на достижения коллектива кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин (ДАиГМ) института энергетики и транспортных систем СПбПУ. Исторически сложилось так, что коллектив кафедры внес большой вклад в разработку всемирно известных теперь военных машин (основные танки Т-64 и Т-80 — наиболее яркие примеры) не только непосредственным участием в проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, но и подготовкой специалистов, определивших облик и традиции современного отечественного танкостроения и других отраслей военной промыш-

ленности. В этом отношении научный и педагогический вклад СПбГПУ соизмерим со вкладом МВТУ имени Н.Э. Баумана и других крупных вузов СССР. Поэтому приглашение делегации СПбГПУ к участию в «Российской выставке вооружения. Нижний Тагил-2013» не является неожиданным.

Кафедра ДАиГМ образована в декабре 2012 году путем объединения двух кафедр — «Колесные и гусеничные машины» и «Двигатели внутреннего сгорания» энергомашиностроительного факультета СПбГПУ, история которых, а также основные направления учебной и научной деятельности достаточно подробно освещены на странице сайта СПбГПУ [1]. В области военно-транспортного машиностроения на выставке в Нижнем Тагиле кафедра представлена как специализирующаяся на вопросах проектирования узлов и агрегатов шасси военных гусеничных и колесных машин (основные танки, плавающие, десантируемые боевые и военно-инженерные машины и др.), тепловых двигателей и силовых установок.

В 1909 году Петербургский политехнический институт объявил прием на специальность «Двигатели внутреннего сгорания и автомобили».

С самого начала подготовки инженеров по автомобильной, а затем и автотракторной специальности обучение было направлено на выпуск специалистов широкого профиля с глубокой фундаментальной подготовкой. Формированию у выпускников высокой профессиональной компетенции способствовали и тесные связи кафедры с основными предприятиями транспортного машиностроения. Это позволило менять акценты в обучении инженеров в зависимости от потребностей промышленности и выпускать квалифицированных специалистов как по автотракторной технике, так и по транспортным машинам многоцелевого назначения (танки, быстроходные машины высокой проходимости и т. п.).

В конце 20-х и начале 30-х годов, в период становления транспортного машиностроения в СССР, выпускники кафедры внесли большой вклад в разработку и освоение новых промышленных образцов колесной и гусеничной техники. Например, прототип одного из первых серийных легковых автомобилей Л-1 («Ленинград-1») создавался при непосредственном уча-

стии выпускников и сотрудников Политехнического института.

Следует отметить также важную для предвоенного времени работу кафедры по созданию газогенераторных установок, позволяющих использовать в качестве топлива для двигателей торф и древесные чурки. Автомобили с такими установками начали выпускаться с 1938 года. А после войны в лесной промышленности появились трелевочные тракторы КТ-12 с газогенераторами.

В числе знаменитых выпускников более позднего времени вспоминают обычно таких всемирно известных разработчиков танков и другой военной техники, как Николай Леонидович Духов (выпускник 1932 года, руководитель группы разработчиков танков серий КВ, ИС, самоходных артиллерийских установок на их базе; после окончания войны был одним из руководителей создания в СССР ядерного оружия), Михаил Ильич Кошкин (выпускник 1934 года, главный конструктор танка Т-34), Сергей Петрович Изотов (выпускник 1941 года, создатель первого в мире серийного танкового газотурбинного двигателя, знаменитый конструктор авиационных двигателей).

Среди выпускников кафедры много кандидатов и докторов наук. Многие стали руководителями различного ранга на производстве, в НИИ и учебных заведениях.

Специализация на подготовке инженеров-танкостроителей начинается в Ленинградском политехническом институте в 1946 году под руководством Жозефа Яковлевича Котина — крупнейшей фигуры советского танкостроения. С этого момента расширяется сфера научно-практической деятельности кафедры, развиваются научные школы: проектирования силовых передач; исследования зубчатых передач; исследования тепловых режимов работы агрегатов шасси, износостойкости фрикционных элементов управления трансмиссий; синтеза схем планетарных коробок передач и др. Позже сотрудники кафедры принимали участие в работе над планетоходами (проекты «Луноход», «Марс-96», «Фобос») и занимались проектированием и отработкой тепловых режимов космических аппаратов.

В 1975 году Министерством оборонной промышленности СССР при кафедре была органи-

зована отраслевая научно-исследовательская лаборатория транспортного машиностроения. Исследования велись по заказам ВНИИ транспортного машиностроения, Кировского завода и других организаций.

В настоящее время перед кафедрой стоят такие актуальные и не нашедшие еще признанного в практике решения проблемы, как разработка бесступенчатых механических трансмиссий, роботизация транспортных машин, разработка боевых машин для особых условий (городской бой, зона Арктики и Антарктики, малогабаритные машины для разведывательных и диверсионных операций и др.). Даже являясь формально «открытыми», эти темы тем не менее мало освещаются в научной литературе, так как в перспективе даже кажущиеся сейчас малозначительными результаты представляют огромную ценность для военно-технической отрасли. По той же причине приходится осторожно подходить к вопросам международного сотрудничества.

В силу этого — сравнительно малый объем публикаций в отечественных и зарубежных открытых источниках, входящих в различные системы цитирования. Однако это компенсируется вводом в эксплуатацию новых образцов техники, модернизацией существующих машин, другими практическими достижениями, в основе которых лежат результаты и научно-исследовательских работ, и учебной деятельности. Среди выпускников кафедры — и лауреаты Государственных премий, и высококвалифицированные инженеры, находящие технические решения, которые и обеспечивают высокий уровень разработок отечественной военной техники.

Участие в работе «РАЕ-2013» — для кафедры не столько торжественное мероприятие, сколько возможность поиска новых тем НИР и ОКР, развития существующих отношений с заказчиками и соисполнителями, установления новых связей. Основным партнером в перспективных и долгосрочных проектах оборонного значения, несомненно, может быть только государство. Поэтому для рассмотрения участниками и гостями выставки подготовлен пакет предложений по темам НИР и ОКР, предлагаемых СПбГПУ для дальнейшего развития и разработки при наличии финансирования со стороны госструктур.

Основные из этих тем и их краткая характеристика (а также ссылки на литературные ис-

точники, сжато поясняющие сформулированные положения) приведены ниже, поскольку представляют интерес для отрасли в целом и отдельных предприятий оборонно-промышленного комплекса, занятых поиском перспективных инженерно-технических решений в актуальных областях машиностроения.

Танк предельных параметров [2]. Цель: повышение ударной мощи сухопутных войск России путем принятия на вооружение тактического танка предельных параметров. Ожидаемый результат: разработка проекта перспективного танка с тактико-техническими характеристиками (ТТХ), превышающими уровень зарубежных аналогов.

Система управления поворотом танка с бортовыми коробками передач. Цель: повышение управляемости танков в повороте за счет системы управления фрикционами бортовых коробок передач с использованием метода широтно-импульсной модуляции. Ожидаемый эффект: увеличение средних скоростей движения на марше; снижение утомляемости водителя; снижение затрат на обучение экипажа; снижение потерь мощности; появление возможности дистанционного управления танком.

Система автоматического натяжения гусениц. Цель: повышение быстродействия системы автоматического натяжения гусеницы и ее надежности. Ожидаемый результат: снижение усилия предварительного натяжения гусениц; повышение устойчивости гусениц в обводе при движении; расширение возможностей по разработке управляемых систем поддрессоривания.

Управляемый амортизатор [3]. Цель: создание амортизатора с изменяемыми (в зависимости от условий движения машины и с учетом его нагрева) характеристиками. Ожидаемый результат: повышение подвижности колесных и гусеничных машин в тяжелых дорожных условиях и исключение перегрева амортизаторов.

Релаксационный гидроамортизатор для танка [4]. Цель: обеспечение приспособляемости характеристик амортизатора к условиям движения за счет сжатия жидкости. Ожидаемый эффект: увеличение высоты проходной неровности до 13,5 %.

Бесступенчатая передача для транспортных и тяговых машин [5]. Цель: создание механической саморегулируемой передачи (*Infinitely Variable*

Transmission) нефрикционного типа с непрерывным изменением передаточного отношения в «бесконечно» широком диапазоне скоростей вращения выходного вала, включая так называемый стоповый режим (неподвижный выходной вал при вращающемся входном вале).

Ожидаемый эффект: увеличение средних скоростей движения, улучшение экологичности транспорта, повышение производительности технологического оборудования, облегчение управлением движением, снижение утомляемости водителей и др.

Рекуперативные механические приводы для автотранспорта [6]. Цель: создание в подвеске транспортных средств и в приводе ведущих колес рекуперативных систем на основе применения механических бесступенчатых передач и маховичных накопителей, использующих энергию, теряемую при колебаниях корпуса и при торможении, для разгона транспортных средств. Ожидаемый эффект: разгон и движение с выключенным двигателем за счет накопленной кинетической энергии маховика; уменьшение расхода топлива до 40 % в городском цикле; сокращение вредных выбросов в атмосферу; уменьшение износа тормозных систем.

Гибридная силовая установка для перспективных военных транспортных машин. Цель: повышение мобильности, живучести и подвижности машин на основе применения электромеханического привода. Ожидаемый эффект: более свободная компоновка силовой установки; улучшение управляемости, устойчивости, отсутствие (минимизация риска) блокировки и буксования колес; снижение акустического и теплового полей.

Оптико-механические защитные устройства нового поколения [7]. Цель: создание защитных устройств транспортных оптико-механических систем наблюдения на основе новых принципов многократного восстановления оптических свойств экранирующего элемента. Ожидаемый эффект: обеспечение стабильности оптических характеристик транспортных оптико-механических систем наблюдения в условиях влияния широкого спектра загрязняющих и повреждающих (механические, термические, химические и радиационные) воздействий окружающей среды.

Модернизация динамической защиты бронетанковой техники. Цель: расширение возмож-

ностей защиты боевой машины и членов ее экипажа. Ожидаемый эффект: воздействие на средства поражения и живую силу противника, находящуюся непосредственно на объекте или вблизи него, поражающими факторами защитного устройства динамического типа, установленного на броне.

Боеприпасы нового поколения для огнестрельного оружия. Цель: увеличение массы и/или начальной скорости снаряда за счет применения оригинальной конструкции, отделяющей пороховой заряд от снаряда. Ожидаемый эффект: улучшение баллистики снаряда в канале ствола и в полете; повышение срока службы оружия; уменьшение потребной навески пороха на 50–70 %; уменьшение длины ствола на одну треть.

Боеприпасы бесшумного действия. Цель: разработка бесшумных боеприпасов для стрелкового оружия, основанная на новых принципах запирания пороховых газов в гильзе. Ожидаемый эффект: повышения эффективности боевых действий Вооруженных сил Российской Федерации.

Шасси боевых машин для арктических условий [8]. Цель: создание информационной, научной и инженерно-технической базы сопровождения проектов шасси боевых, разведывательных и военно-транспортных гусеничных машин для условий Арктики и Антарктики. Ожидаемые результаты: выбор и обоснование основных ТТХ шасси боевых и военно-транспортных гусеничных машин; предложения по формированию типоразмерного ряда машин; выбор основных параметров узлов и агрегатов шасси; первичная (эскизная) проработка компоновочных решений; выполнение комплекса сопровождающих расчетов.

Автономное роботизированное транспортное средство [9]. Цель: автономизировать процесс контроля и уборки напольных поверхностей помещений атомных станций, военных объектов, складов и цехов высокотехнологичных производств. Ожидаемый результат: эскизный проект машины и выполнение комплекса сопровождающих расчетно-теоретических исследований.

Мобильная мишень [10]. Цель: создание комплекса мобильных мишеней для повышения уровня специальной подготовки военнослужащих. Ожидаемый эффект: повышение уровня специальной подготовки военнослужащих.

Мобильный реабилитационный тренажер.

Цель: создание комплекса мобильных тренажеров для восстановления двигательных функций у военнослужащих с повреждениями нервно-мышечных тканей и спинного мозга. Ожидаемый эффект: ускорение реабилитации военнослужащих, получивших ранения.

Перечисленные темы НИР и ОКР выполняются при непосредственном участии преподавателей и сотрудников кафедры ДАиГМ с привлечением предприятий отрасли (ОАО «ВНИИ транспортного машиностроения», ОАО «ПКБ Автоматика», ОАО «Спецмаш» и др.).

Промежуточные результаты разработок активно используются в учебном процессе кафедры ДАиГМ. Студентами кафедры были выполнены выпускные квалификационные работы по многим из перечисленных тем НИР. Преподавателями и сотрудниками опубликован ряд научных работ. Наиболее важные результаты включены в учебно-методическую базу кафедры.

Спектр проводимых НИР и ОКР, научный и творческий потенциал кафедры ДАиГМ, развитая сеть компетентных соисполнителей позволяют СПбГПУ сохранять ведущие позиции в вопросах научно-технического сопровождения высокотехнологичных проектов в области во-

оружия и военной техники (в частности в темах, связанных с вопросами расчета и проектирования шасси, двигателей и силовых установок боевых, разведывательных и военно-транспортных гусеничных и колесных машин).

Учет возможностей ведущих вузов России при развитии инвестиционной политики в вопросах НИР и ОКР, плановое выделение средств на развитие перспективных проектов позволят существенно повысить уровень разработок в области вооружений и военных технологий.

Опубликование ряда открытых результатов НИР в области проектирования специальных транспортных машин и их двигателей будет способствовать усилению позиции СПбГПУ в мировых рейтингах вузов и, в частности, выполнению цели программы «5–100–2020», находящейся сейчас в центре внимания руководства Политехнического университета.

Развитие связей с предприятиями и конструкторскими бюро отрасли, основанное на кооперации по выполнению государственных заказов в области проектирования шасси, двигателей и силовых установок специальных машин, будет способствовать углублению образовательного процесса, позволит привлечь в отрасль молодые кадры высокой квалификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <http://www.spbstu.ru/departments/base/ets/kgm/index.htm> (дата обращения: 24.09.2013).
2. **Ефремов А.С.** Танк предельных параметров — мечта или реальность? // Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. 2011. №5.
3. **Волков Ю.П., Герасимов И.М., Марецкий П.К.** Гидроамортизатор, адаптирующийся к дорожным условиям // Автомобильная промышленность. 2004. № 6. С. 20–22
4. **Зотов А.С., Герасимов И.М.** Релаксационный гидроамортизатор // Сб. матер. Международной межвуз. науч.-техн. конференции студентов и аспирантов «XXXIX Неделя науки СПбГПУ». 02–09 дек. 2010 г. Ч. II. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 44–45
5. **Благодаров А.А., Худорожков С.И.** Динамическая характеристика саморегулируемой механической бесступенчатой передачи // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. № 6. С. 19–24.
6. **Худорожков С.И.** Рекуперативный механический бесступенчатый привод для велосипедов // Сб. статей 11-й междунар. научно-практ. конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах». — Оренбург, 2013. С. 549–561.
7. **Семёнов А.Г.** Защита и восстановление оптических свойств средств наблюдения: монография. Germany, Saabrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 104 с
8. **Бажуков А.Е., Добрецов Р.Ю., Семенов А.Г.** Предложения по выбору основных элементов ходовой части боевой машины для арктических условий // Вестник академии военных наук. 2012. №4(45). С. 111–116. М.: Военное изд-во МО РФ, 2012.
9. **Авогин Е.В., Добрецов Р.Ю., Епишин К.В.** Робот для очистки напольных поверхностей помещений: исследования в обеспечение создания прототипа // Инноватика и экспертиза: Научные труды Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт — Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (ФГБНУ НИИ РИНУЦЭ). — 2012. Вып. 2(9). С. 8–15.
10. **Семёнов А.Г., Элизов А.Д., Цветков В.В.** Антитеррор: электроприводные мобильные мишени //



Инновационная политика и изобретатели (Россия— начало XXI века): матер. Межрегиональной научно-технической конференции изобретателей и каталог Городской выставки изобретений 28–29 апреля 2009

года / Творческий союз изобретателей Санкт-Петербурга; Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; под ред. Ю.Г. Попова, А.Г. Семенова. СПб., 2010. С. 234–236.

REFERENCES

1. URL: <http://www.spbstu.ru/departments/base/ets/kgm/index.htm> (дата обращения: 24.09.2013).
2. **Efremov A.S.** Tank predel'nykh parametrov— mechta ili real'nost'? *Tekhnika i vooruzhenie vchera, segodnia, zavtra*. 2011. №5. (rus.)
3. **Volkov Yu.P., Gerasimov I.M., Maretskiy P.K.** Gidroamortizator, adaptiruyushchiysya k dorozhnym usloviyam. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2004. № 6. S. 20–22. (rus.)
4. **Zotov A.S., Gerasimov I.M.** Relaksatsionniy gidroamortizator. *Sb.: Mater. Mezhdunarodnoy mezhvuz. nauch.-tekhn. konferentsii studentov i aspirantov «XXXIX Nedelya nauki SPbGPU. 02–09 dek. 2010 g. Ch.II.— SPb.: Izdvo SPb gos. politekhn.un-ta, 2010. S. 44–45.* (rus.)
5. **Blagonravov A.A., Hoodorozhkov S.I.** Dinamicheskaya kharakteristika samoreguliruemoy mekhanicheskoy besstupenchatoy peredachi. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2002. № 6. S. 19–24. (rus.)
6. **Hoodorozhkov S.I.** Rekuperativniy mekhanicheskii besstupenchatiy privod dlya velomobiley. *Sbornik statey 11-y mezhhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Progressivnie tekhnologii v transportnykh sistemakh»*. Orenburg, 2013. S. 549–561. (rus.)
7. **Semenov A.G.** Zashchita i vosstanovlenie opticheskikh svoystv sredstv nabludeniya: monografiya. Germany, Saabrücken, LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 104 s. (rus.)
8. **Bazhukov A.E., Dobretsov R.Yu., Semenov A.G.** Predlozheniya po vyboru osnovnykh elementov khodovoy chasti boevoy mashiny dlya arkticheskikh usloviy: *Vestnik akademii voennykh nauk*. 2012. №4(45). M.: Voennoe izdvo MO RF, S. 111–116. (rus.)
9. **Avotin E.V., Dobretsov R.Iu., Epishin K.V.** Robot dlia ochistki napol'nykh poverkhnostei pomeshchenii: issledovaniya v obespechenie sozdaniya prototipa. *Innovatika i ekspertiza: Nauchnie trudy Federal'nogo gosudarstvennogo biudzhethnogo nauchnogo uchrezhdeniya «Nauchno-issledovatel'skiy institut— Respublikanskiy issledovatel'skiy nauchno-konsul'tatsionniy tsentr ekspertizy»*. M.: FGBNU NII RINKTSE, 2012. Vyp. 2(9). S. 8–15. (rus.)
10. **Semenov A.G., Elizov A.D., Tsvetkov V.V.** Antiteror: elektroprivodnye mobil'nye misheni. *Innovatsionnaya politika i izobretateli* (Rossiya— nachalo XXI veka): materialy Mezhhregional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii izobretateley i katalog Gorodskoi vystavki izobreteniya 28–29 aprelya 2009 goda / Tvorcheskii soyuz izobretateley Sankt-Peterburga; Sankt-Peterburgskiy gosudarstvenniy politekhnicheskii universitet; pod red. Yu.G. Popova, A.G. Semenova. SPb., 2010. S. 234–236. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАЛЬШЕВ Юрий Витальевич — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: engine@pef.spbstu.ru

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — кандидат технических наук профессор кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: dr-idpo@yandex.ru

ПОРШНЕВ Геннадий Павлович — доктор технических наук профессор кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: kgm-spb@list.ru

ХУДОРОЖКОВ Сергей Иванович — доктор технических наук профессор кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: xcu-55@mail.ru

AUTHORS

GALISHEV Yuriy V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: engine@pef.spbstu.ru

DOBRETsov Roman Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: dr-idpo@yandex.ru

PORSHNEV Gennadiy P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kgm-spb@list.ru

HOODOROZHKOv Sergey I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: xcu-55@mail.ru

УДК 620.92:4.042(075.8)

Ю.С. Васильев, Л.И. Кубышкин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Yu.S. Vasil'ev, L.I. Kubyshkin

USE OF PARAMETRIC MODELS IN DESIGN HYDROPOWER PLANTS

Рассмотрены вопросы применения современных компьютерных технологий при проектировании гидроэнергетических установок. Представлена методика автоматизации проектирования гидроэнергетических установок с использованием банка параметрических моделей сооружений и оборудования проектируемых объектов.

ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА; ПРОЕКТИРОВАНИЕ; САПР; ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; БАНК ДАННЫХ.

The article discusses the use of modern computer technology in the design of hydropower plants. Presents a methodology for design automation of hydropower plants using parametric models of the bank facilities and equipment designed objects.

HYDROPOWER PLANTS; DESIGN; CAD SYSTEM; PARAMETRIC MODEL; DATABASE.

Обзор традиционных методов проектирования объектов гидроэнергетики

Проектирование гидроэнергетических объектов (ГЭО) базируется на комплексной проработке различных вопросов, относящихся к гидромашиностроению, электромашиностроению, гидромеханике, гидротехнике, производству работ, экономике и охране окружающей среды. Эффективная совместная работа специалистов разного профиля при проектировании гидроэлектростанций (ГЭС) и гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) обеспечивается имеющимися в проектных организациях техническими средствами, упрощающими и ускоряющими создание проектной документации.

Периоды совершенствования технологии проектирования гидроэнергетических объектов. До 60-х годов прошлого столетия в качестве технических средств, упрощающих и ускоряющих

создание проектной документации, использовались кульманы, механические счетные машины, копировальные аппараты. Проектная документация выпускалась на листах бумаги («синьках») разного формата. Можно выделить четыре периода в развитии и совершенствовании применения вычислительной техники в проектной практике, каждый из которых связан с освоением инженерами-гидроэнергетиками ресурсов и возможностей очередного поколения ЭВМ и нового программного обеспечения:

1. Вопросы автоматизации проектирования ГЭО начали решаться с появлением в 60-е годы прошлого столетия в организациях энергетической отрасли электронных аналоговых вычислительных машин (МН-7, МН-10, Ритм) и цифровых ЭВМ первого поколения (Урал) [1, 2].

2. Накопленный в 60–90-е годы опыт использования ЭВМ в проектной практике, соз-

данные за это время библиотеки алгоритмов и программ, освоение новых технологий разработки проектной документации привели к изменению структуры проектной организации и задач, решаемых в ее подразделениях.

3. С появлением ЭВМ второго (Наири, Минск-3, Одра), затем третьего (ряд ЭВМ ЕС) поколений, новых языков программирования и новых режимов работы на этой технике появилась возможность создавать программное обеспечение для моделирования сложных переходных процессов в водопроводящих трактах и сооружениях ГЭС [3, 4]. В этот период разрабатываются государственные стандарты и формулируются требования к системам автоматизированного проектирования гидроэнергетических объектов (САПР ГЭС) [5].

4. В Ленинградском политехническом институте (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) в эти годы выполняется ряд хозяйственных научно-исследовательских работ по созданию математического, программного, информационного и лингвистического обеспечения САПР ГЭС [2]. Новые технологии проектирования ГЭС успешно внедряются в учебный процесс [3–5]. В период с 1960-го по 2000-й годы решались следующие проблемы автоматизации проектирования ГЭС:

разработка численных методов решения инженерных задач на ЭВМ, создание программного обеспечения для выполнения ряда вычислительных проектных процедур [6];

формирование общей концепции САПР ГЭС как единого программно-технического комплекса, взаимодействующего со специалистами разных подразделений проектной организации [7];

научное обоснование САПР ГЭС как многоуровневой сетевой иерархической системы с ассоциативными связями и сквозной параметризацией проектируемых объектов [8];

разработка методов и алгоритмов создания трехмерных твердотельных моделей проектируемых объектов электроэнергетики, автоматизация выполнения графических проектных процедур [9–12];

создание банка параметрических моделей строительных конструкций, сооружений, основного и вспомогательного оборудования гидроэнергетических объектов, разработка методики

автоматизированного проектирования ГЭС в среде CAD — CAM — CAE (геометрическое моделирование — моделирование физических процессов — производство) [13, 14].

Стадии проектирования объектов возобновляемой энергетики. До 2008 года в отделениях института Гидропроект существовало 6 стадий проектирования гидроэнергетических объектов: технико-экономическое обоснование (ТЭО); технико-экономический расчет (ТЭР); эскизный проект (ЭП); проект (П); рабочий проект (РП); рабочая документация (Р).

На стадии ТЭО рассматривались и оценивались возможные схемы комплексного использования гидроэнергоресурсов реки или бассейна.

На стадии ТЭР выполнялись технико-экономические расчеты и составлялись документы по проектированию и строительству объекта для доклада и утверждения в Госстрое, Госплане и Совете Министров СССР.

На стадии ТЭО определялись и обосновывались основные технические параметры проектируемого объекта.

На стадии П выполнялась детальная проработка основных технических решений, оптимизировались параметры основных сооружений и оборудования.

На стадии РД группой рабочего проектирования на строящемся объекте выпускалась и корректировалась проектно-сметная документация.

В настоящее время в связи с вступлением в силу Положения о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию, утвержденного Постановлением Правительства РФ №87 от 16.02.2008, не предусматривается стадийность проектирования, а вводятся понятия «проектная документация» и «рабочая документация». Однако можно выделить вариант проектирования, когда разработка проектной и рабочей документации ведется параллельно (и тогда можно говорить об одностадийном проектировании), а также вариант, когда разработка рабочей документации ведется уже после утверждения проектной (в этом случае говорят о двухстадийном проектировании).

Схема процесса проектирования зависит от типа объекта, категории его сложности и степени детализации.

Как правило, проекты крупных жилых, общественных и промышленных зданий создаются в две стадии («Проект» и «Рабочая документация»). В этом случае сначала разрабатывается технический проект (стадия «Проект»), затем рабочие чертежи (стадия «Рабочая документация»). Помимо этого, в случаях разработки проектной документации для особо сложных объектов требуется разработка «Предпроектного предложения».

Если объект небольшой и несложный, то проектирование ведется в одну стадию: разработки технического проекта и рабочих чертежей совмещаются; в этом случае разрабатывается так называемый «Рабочий проект». В одну стадию разрабатывают проекты индивидуальных жилых и общественных зданий при условии, что это технически несложные объекты, а также проекты типовых зданий.

Соотношение категории сложности объекта и необходимого количества стадий проектирования можно выразить следующим образом:

одностадийное проектирование («Рабочий проект», включающий утверждаемую часть и рабочую документацию) — для объектов, строящихся по типовым и повторно применяемым проектам;

двухстадийное проектирование («Проект», «Рабочая документация») — для объектов V, IV категорий сложности и для объектов, создающихся по индивидуальным проектам;

двухстадийное проектирование, включающее стадию «Предпроектное предложение» («Предпроектное предложение», «Проект», «Рабочая документация») — для объектов V, IV категорий сложности и для объектов III категории с недостаточным перечнем исходно-разрешительной документации.

Этапы жизненного цикла объектов возобновляемой энергетики. Жизненный цикл объекта возобновляемой энергетики как физического объекта — это последовательность процессов существования объекта недвижимости от замысла до ликвидации (утилизация).

Этапы жизненного цикла объекта возобновляемой энергетики подразделяются так: предпроектный — проектный — строительства — эксплуатации — закрытия (рис. 1) [11]. Внешняя стрелка на рисунке показывает последовательность этапов жизненного цикла объекта ВЭ.

Предпроектный (начальный) этап включает анализ рынка недвижимости, выбор объекта недвижимости, формирование стратегии проекта, инвестиционный анализ, оформление исходно-

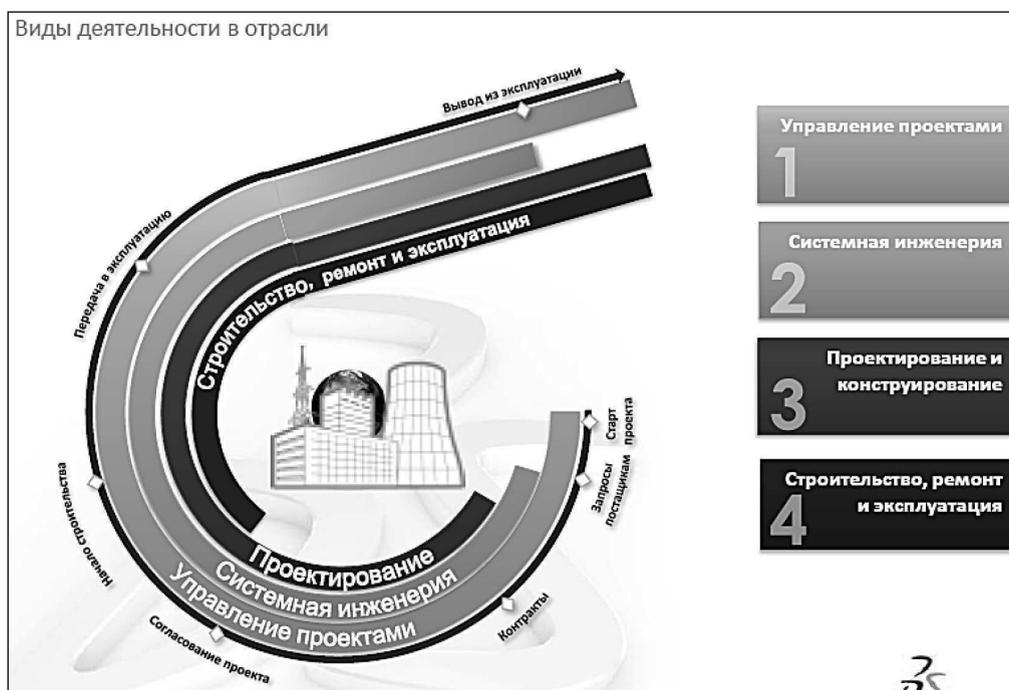


Рис. 1. Этапы жизненного цикла объекта возобновляемой энергетики

разрешительной документации, привлечение кредитных инвестиционных средств.

Этап проектирования включает разработку финансовой схемы, организацию финансирования, выбор архитектурно-инженерной группы, руководство проектированием. Основные задачи этого этапа — повышение потребительских качеств объектов недвижимости и — самое главное — минимизация эксплуатационных затрат на всех этапах жизненного цикла. Очевидно, что на первых двух этапах прибыль не образуется, так как они имеют мотивационный характер.

На этапе строительства выбирается подрядчик, координируется ведение строительных работ и контролируется качество строительства. На данном этапе появляются реальные свидетельства соответствия строящегося объекта требованиям сегмента рынка недвижимости, обусловленные логикой жизненного этапа. В этот период решаются задачи увеличения доли вложений потенциальных потребителей, так как рост объема предложений и прибыли свидетельствует о достаточно широком рыночном признании.

Этап эксплуатации объекта предполагает обслуживание и ремонт сооружений и оборудования, их реконструкцию, материальный учет, противопожарную охрану и технику безопасности, управление коммуникациями, утилизацию и переработку отходов, устранение аварийных ситуаций и охрану объекта.

Этап закрытия объекта — полная ликвидация его первоначальных и приобретенных функций. Результат — либо снос объекта, либо качественно новое его развитие. На этом этапе требуются значительные затраты. Если объект недвижимости получает новое качественное развитие, затраты на его изменение относятся к затратам владения в расчете на его новую функцию.

Предлагаемая инновационная методика параметрического моделирования проектируемых ГЭО

Параметрическое моделирование сооружений и оборудования объектов возобновляемой энергетики. Представленная выше концепция проектирования объектов возобновляемой энергетики предусматривает автоматизацию работы специалистов проектной организации как на этапе создания трехмерных твердотельных моделей

(3D-моделей) объекта, так и на этапе выпуска графических проектных документов — чертежей [13]. Графические системы, ориентированные на такие отрасли, как, например, машиностроение и промышленно-гражданское строительство, имеют библиотеки стандартных компонентов и унифицированных конструкций. Они упрощают процесс создания и многократного использования готовых элементов моделируемого объекта, что дает возможность автоматизировать создание 3D-модели проектируемого объекта. Отсутствие такого информационного обеспечения для проектирования объектов возобновляемой энергетики не позволяет автоматизировать этот наиболее ответственный и трудоемкий этап новой технологии проектирования. Сказанное свидетельствует об актуальности разработки библиотек параметрических моделей компонентов и сооружений установок возобновляемой энергетики.

Идея использования параметрических моделей появилась еще на ранних этапах развития систем автоматизированного проектирования, но долгое время не могла быть реализована по причине недостаточной производительности компьютеров. В настоящее время библиотечные компоненты широко используются при проектировании зданий и сооружений, механического и электротехнического оборудования в графических пакетах ArchiCAD, Inventor, Civil 3D и др.

Параметрическое моделирование существенно отличается от обычного трехмерного моделирования. Конструктор создает модели объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения размеров деталей объектов, их конфигурации и взаиморасположения. Таким образом, ранее разработанные и сохраненные в библиотеке модели конструктивных компонентов объектов возобновляемой энергетики могут многократно использоваться в 3D-моделях новых проектируемых объектов.

В представленном далее материале на примере проекта гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС) предлагается решение следующих вопросов:

выбор программных пакетов для создания параметрических моделей конструктивных компонентов и разработка методики их создания;

разработка математического описания этих моделей;

разработка прикладного программного обеспечения для реализации расчетов базовых и зависимых от них параметров;

создание библиотеки параметрических моделей конструктивных компонентов основного оборудования и сооружений для установок возобновляемой энергетики.

Анализ возможностей используемого сегодня технического и программного обеспечения инженерной компьютерной графики в проектных и научно-исследовательских организациях гидроэнергетического профиля (ОАО «Ленгидропроект», ОАО «СГЭМ», ОАО «РусГидро», ЗАО «МНТО ИНСЭТ») и в учебном процессе показывает, что моделирование объектов возобновляемой энергетики следует выполнять в интегрированной среде AutoCAD Civil 3D + Autodesk Inventor + 3ds Max [13, 14]. Эти графические пакеты освоены и широко используются в перечисленных проектных, научно-исследовательских организациях и учебном процессе подготовки специалистов в высших учебных заведениях.

В качестве среды для создания трехмерных параметрических моделей оборудования и сооружений ГЭО может быть использован графический пакет Autodesk Inventor [14]. Особенность этого графического пакета — использование управляющих размеров, что и определяет возможности его как среды для создания библиотечных параметрических конструктивных компонентов ГЭО. Кроме того, функциональные возможности Autodesk Inventor позволяют производить математические операции (задание размеров в виде формул), а также использовать адаптивную технологию моделирования при помощи наложения зависимостей, что дает возможность упростить не только математическое описание модели, но и управление моделью пользователем.

Одним из преимуществ использования графического пакета Autodesk Inventor является автоматизация выпуска проектной документации. Чертежи в среде Inventor создаются на основе построенных 3D-моделей и представляют собой набор проекций, видов, разрезов, узлов объекта. На рис. 2 приведены примеры проектных документов, полученных на основе сборок ГАЭС шахтного типа и проточного тракта ГАЭС, а также чертежи отдельных деталей.

Создаваемый чертеж отображает текущее состояние модели. При внесении изменений в модель они автоматически отображаются на всех чертежах, полученных на ее основе, что исключает возможность появления несогласованных чертежей.

Создаваемые параметрические модели конструктивных компонентов ГЭО имеют один или несколько базовых параметров (размеров). Остальные параметры определяются с помощью математических зависимостей. Изменение значений базовых параметров приводит к изменению конфигурации и размеров модели.

Ниже приведено математическое описание некоторых конструктивных компонентов оборудования и сооружений ГЭО, используемых для создания трехмерной параметрической модели ГАЭС.

Рабочее колесо обратимой гидротурбины. В качестве базового параметра, управляющего размерами модели рабочего колеса обратимой гидротурбины, был выбран его диаметр D_1 , величина которого может быть определена исходя из приведенных ниже зависимостей [6, 14].

Диаметр рабочего колеса насоса-турбины определяется по формуле

$$D_1 = \frac{n'_{I_{\text{н опт}}} \sqrt{H_{\text{н}}}}{n}. \quad (1)$$

Здесь $n'_{I_{\text{н опт}}}$ — приведенная частота вращения насоса-турбины при максимальном КПД; $H_{\text{н}}$ — средний напор гидротурбины, соответствующий оптимуму универсальной характеристики при работе турбины в насосном режиме; n — нормальная частота вращения гидротурбины в насосном и турбинном режимах, определяемая при помощи выражения

$$n = \frac{n_{SH} H^{3/4}}{3,65 \sqrt{Q_{\text{н}}}},$$

где $Q_{\text{н}}$ — расход воды, соответствующий среднему напору в двигательном режиме работы; n_{SH} — коэффициент быстроходности гидротурбины при ее работе в насосном режиме,

$$n_{SH} = 3,65 \frac{n \sqrt{Q_{\text{н}}}}{H_{\text{н}}^{3/4}} = 3,65 n'_{I_{\text{н опт}}} \sqrt{Q'_{I_{\text{н опт}}}};$$

$Q'_{I_{\text{н опт}}}$ — приведенный расход турбины в насосном режиме, соответствующий максимальному коэффициенту полезного действия (КПД).

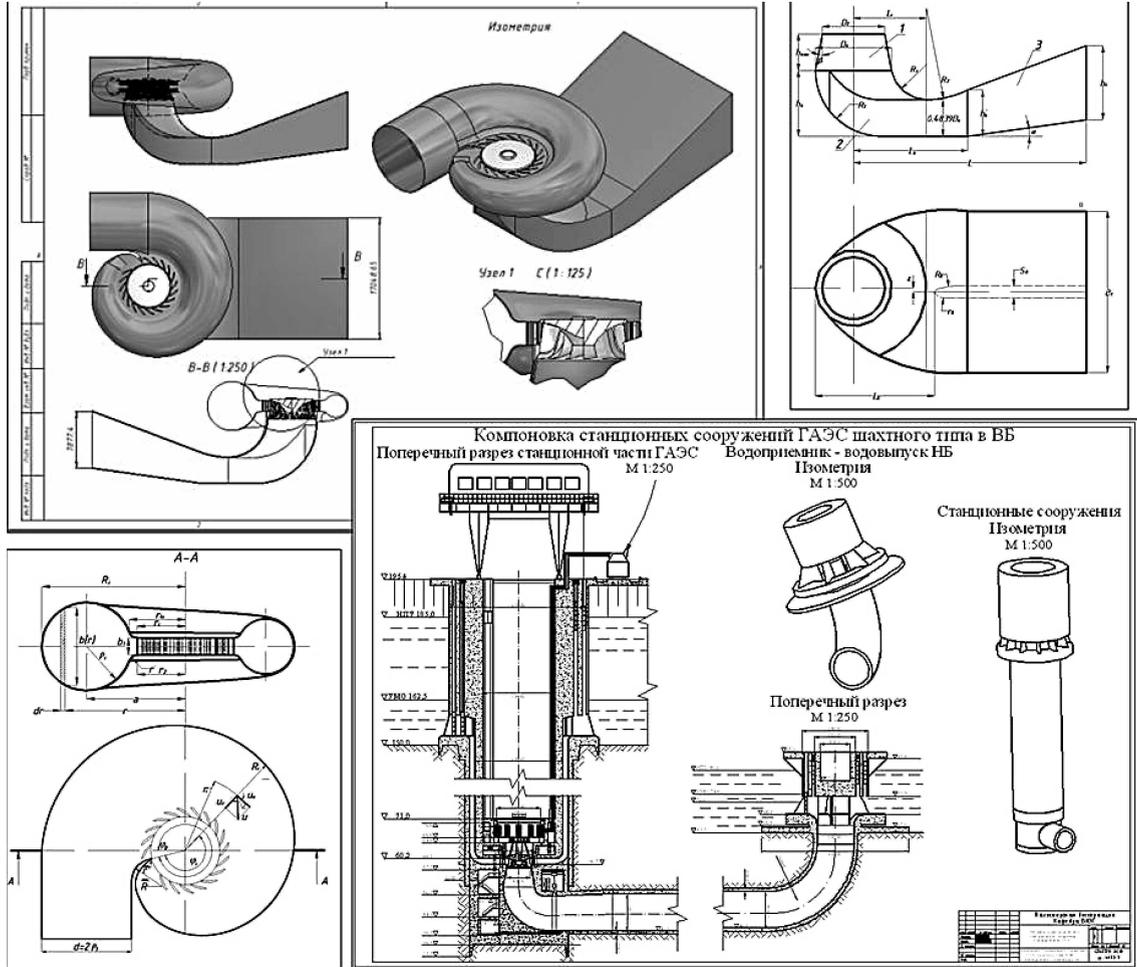


Рис. 2. Примеры оформления проектной документации в виде чертежей и плакатов

Приведенная частота вращения насоса-турбины и расход при максимальном КПД могут быть определены по таблицам систематизированных данных [15].

Конструктивные компоненты гидротурбины: спиральная камера, колонны статора, отсасывающая труба. Создание параметрических моделей таких конструктивных компонентов гидротурбины, как спиральные камеры, колонны статора и отсасывающие трубы, наиболее целесообразно проводить по существующим отраслевым стандартам [16, 17], которые устанавливают относительные размеры очертаний рассматриваемых элементов.

Гидрогенератор. Базовыми параметрами обратимого гидрогенератора являются диаметр его ротора и высота активной стали. Параметры гидрогенератора находятся согласно рекоменда-

циям, представленным в [18]. Диаметр ротора гидрогенератора D_i определяется следующим выражением:

$$D_i = \frac{\tau^* 2p}{\pi}, \quad (2)$$

где p — число пар полюсов генератора, зависящее от синхронной частоты вращения; τ^* — длина внешней дуги обода ротора, приходящаяся на один полюс; S^* — удельная нагрузка, приходящаяся на один полюс.

Высота активной стали вычисляется по формуле

$$l_a = \frac{30C_a S_p}{\pi n_c D_i^2}, \quad (3)$$

где C_a — коэффициент машины, зависящий от удельной нагрузки S^* на полюс; S_p — расчетная мощность; n_c — синхронная частота вращения.

Математические зависимости, определяющие остальные размеры гидрогенератора, представлены в табл. 1.

Стальной трубопровод. Базовый параметр модели трубопровода ГЭС и ГАЭС — его диаметр. Экономически наиболее выгодные диаметры трубопровода рассчитываются по зависимостям [9] на участках с небольшими напорами ($H \leq 30$ м) по формуле

$$D_{\text{эк}} = \sqrt[6]{\frac{Q_p^3 T_p S_3 \eta_a \beta}{\delta c_{\text{тр}}}}, \quad (4)$$

а для участков с напорами более 30 м экономически наиболее выгодный диаметр находится по зависимости

$$D_{\text{эк}} = \sqrt[7]{\frac{Q_p^3 T_p S_3 \eta_a \beta R}{10 c_{\text{тр}} H}}, \quad (5)$$

где Q_p — расчетный среднекубический расход, м³/с; T_p — расчетное время работы трубопровода, ч; S_3 — стоимость 1 кВт·ч заменяемой электроэнергии, руб./кВт·ч; η_a — средний КПД гидроагрегата, $\eta_a = 0,85-0,90$; β — коэффициент, учитывающий потери энергии в период паводка из-за снижения напора и, вследствие этого, пропускной способности турбин, $\beta = 1,00-1,15$; R — расчетное сопротивление материала трубопровода, кг/см²; δ — толщина оболочки трубопровода, см; $c_{\text{тр}}$ — стоимость 1 т материала трубопровода, его монтажа и окраски, руб.; H — напор на середине участка с учетом гидравлического удара, м.

Толщина оболочки трубопровода определяется по «котельной» формуле

$$\delta \geq \frac{5HD}{R}, \quad (6)$$

где δ — толщина оболочки трубопровода, см; H — расчетный напор, м; D — диаметр срединной поверхности цилиндрического трубопровода, м; R — расчетное сопротивление материала, кг/см².

Расчет экономически наиболее выгодного диаметра трубопровода должен производиться с учетом повышения давления при гидравлическом ударе, величина которого определяется по «цепным» уравнениям [2]:

для конца первой фазы

$$q_1 \sqrt{1+z_1} = q_0 - \frac{z_1}{\zeta};$$

для конца фазы n

$$q_n \sqrt{1+z_n} = q_0 - \frac{zn}{\zeta} - \frac{2}{\zeta} \sum_{i=1}^{i=n-1} z_i,$$

где q_0 — величина начального относительного приведенного расхода воды; q_1 — величина относительного приведенного расхода в конце первой фазы гидравлического удара; q_n — то же в конце фазы n ; z_1, z_i, z_n — относительные повышения напора соответственно для конца фаз 1, i , n ; ζ — первая характеристика эквивалентного трубопровода.

Относительное повышение давления в конце трубопровода при сбросе малых нагрузок рассчитывается по зависимостям

Таблица 1

Выражения, определяющие размеры гидрогенератора

| Элемент генератора | Параметр | Формула |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Статор | Высота корпуса, $h_{\text{ст}}$, м | $1,8I_a$ |
| | Диаметр корпуса, $D_{\text{ст}}$, м | $(1,05+0,0017n_0)D_i$ |
| Верхняя крестовина | Высота, $h_{\text{вк}}$, м | $(0,1-0,12)D_i$ |
| | Диаметр лучей, $D_{\text{вк}}$, м | $D_{\text{ст}}$ |
| Подпятник | Высота, $h_{\text{п}}$, м | $(0,15-0,2)D_i$ |
| | Диаметр кожуха $D_{\text{п}}$, м | $(0,4-0,5)D_i$ |
| Шахта | Диаметр шахты, $D_{\text{ш}}$, м | $D_i-0,5$ |
| Надстройка | Диаметр D_0 , м | $(0,3-0,5)D_i$ |
| | Высота h_0 , м | $(0,3-0,4)$ м |
| Кратер | Диаметр $D_{\text{кр}}$, м | $(1,4-1,5D_i)$ |

$$z_{пр} = \zeta q_0 \text{ при } 0 \leq q_0 \leq q_{кр};$$

$$z_1 = \frac{2\sigma}{1 + 0,5\zeta q_0 - \sigma} \text{ при } q_{кр} < q_0 < \frac{2}{\zeta};$$

$$z_m = \frac{2\sigma}{2 - \sigma} \text{ при } \frac{2}{\zeta} \leq q_0 \leq 1,$$

где σ — вторая характеристика эквивалентного трубопровода; $q_{кр}$ — критическая величина начального относительного приведенного расхода.

Поскольку основные средства графического пакета Autodesk Inventor не дают возможности проведения расчетов, необходимых для определения диаметра рабочего колеса D_1 и экономически наивыгоднейшего диаметра трубопровода $D_{эк}$, для проведения этих расчетов на базе MS Excel были созданы специальные программы, связанные с графическим пакетом Autodesk Inventor.

Программа расчета диаметра рабочего колеса насоса-турбины. Исходными данными для расчета диаметра рабочего колеса обратимой гидротурбины были выбраны тип, расчетный напор, расчетный расход насоса-турбины. При их задании в автоматическом режиме из таблицы систематизированных данных [6] выбираются соответствующие заданному напору приведен-

ная частота вращения $n'_{н\text{опт}}$ и приведенный расход $Q'_{I\text{н\text{опт}}}$ насоса-турбины при максимальном КПД. По полученным данным рассчитывается коэффициент быстроходности n_{SH} и частота вращения гидротурбины n . Далее автоматически выбирается ближайшая синхронная частота вращения и рассчитывается диаметр рабочего колеса насоса-турбины D_1 .

Завершающий этап автоматического расчета сводится к формированию таблицы параметрических размеров геометрической модели, то есть массива связанных между собой кодов размеров, используемых при создании модели, и их значений, вычисленных в соответствии с заданными коэффициентами. Эта таблица связана с таблицей параметров Autodesk Inventor, данные которой управляют геометрией модели (рис. 3) [14, 19, 20].

На базе охарактеризованного выше математического описания и прикладного программного обеспечения в графической среде Autodesk Inventor были созданы и включены в соответствующие библиотеки геометрические модели основного оборудования и водопроводящего тракта ГЭО (табл. 1, 2). Параметры 3D-моделей оборудования и сооружений определялись по формулам (1)–(6). Обозначения, принятые в таблицах: D_1 — диаметр

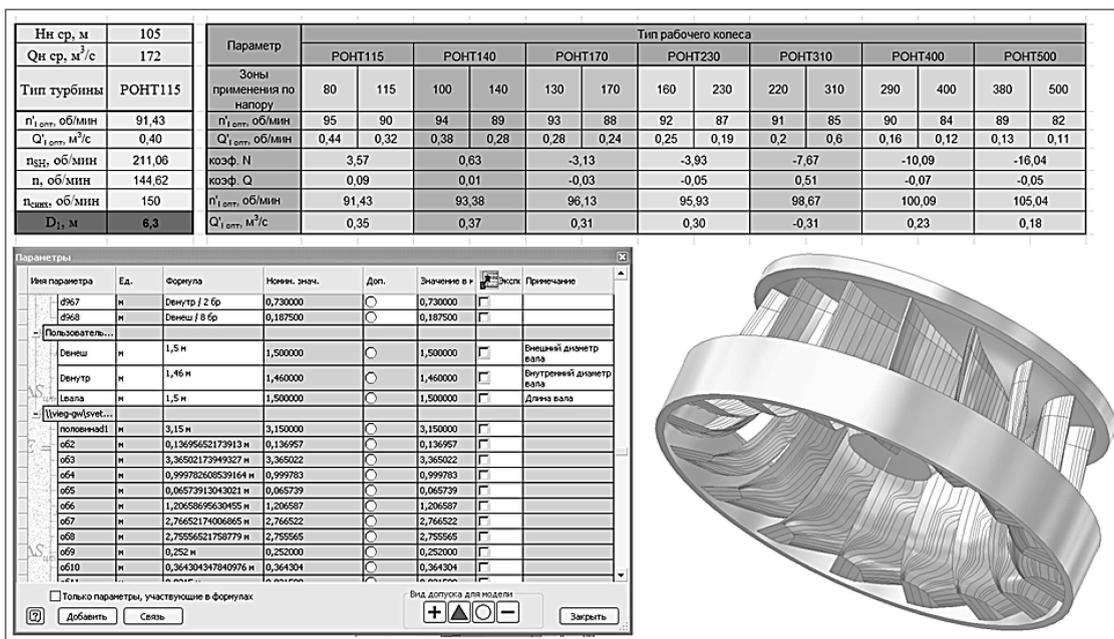
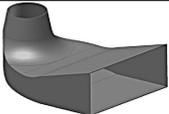
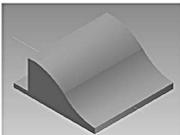
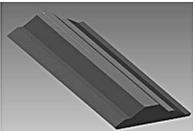


Рис. 3. Внешние таблицы MS Excel, таблица параметров модели и 3D-модель рабочего колеса

Таблица 2

3D-модели оборудования и сооружений ГЭО

| Модель | Наименование | Базовые параметры |
|---|--|----------------------------------|
| <i>Рабочие механизмы гидротурбины</i> | | |
|  |  | Рабочее колесо |
| | | РО ПЛ |
| | | D_1 |
| Направляющий аппарат | | |
|  |  | Лопатки Крышка гидротурбины |
| | | D_1 |
| <i>Закладные части гидротурбины</i> | | |
|  | | Отсасывающая труба |
| | | D_1, β, α |
|  |  | Спиральная камера |
| | | Металлическая Бетонная |
| | | D_1 |
|  | | Статор гидротурбины |
| | | D_1 |
| <i>Двигатель-генератор</i> | | |
|  | | Двигатель-генератор |
| | | D_g, l_a |
| <i>Сооружения</i> | | |
|  | | Трубопровод |
| | | $D_{эк}, \delta$ |
|  | | Водосливная плотина |
| | | h |
|  | | Дамба |
| | | h |
|  | | Гидроагрегатный блок |
| | | h, b |

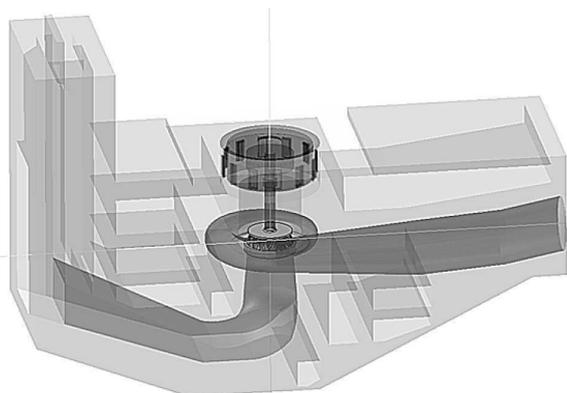


Рис. 4. Размещение основного энергетического оборудования в модели массивной бетонной части ГЭС

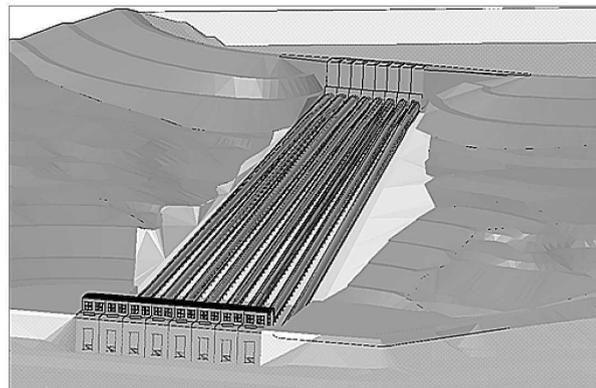


Рис. 5. Модель основных сооружений Ленинградской ГЭС

рабочего колеса; D_i — диаметр ротора генератора; D_k — диаметра входного сечения колена отсасывающей трубы; $D_{эк}$ — экономически наивыгоднейший диаметр трубопровода; $L_{ст}$ — длина профиля колонн статора; l_a — высота активной стали гидрогенератора; ε — эксцентриситет колена отсасывающей трубы; h — высота отсасывающей трубы; α — угол наклона основания выходного диффузора; δ — толщина оболочки трубопровода.

Разработанная методика моделирования была апробирована при проектировании основных сооружений Ленинградской ГЭС, которое производилось с использованием параметрических компонентов, представленных в табл. 2.

Моделирование природных условий и основных гидротехнических сооружений выполнено в графическом пакете AutoCAD Civil 3D.

Полученная трехмерная модель гидроагрегатного блока Ленинградской ГЭС представлена на рис. 4.

Модель основных сооружений природно-технического комплекса Ленинградской ГЭС представлена на рис. 5.

Разработанные способы параметрического моделирования могут быть применены к любым энергетическим объектам на основе возобновляемых источников энергии. Использование управляющих параметров позволяет быстро получать трехмерную модель проектируемого объекта, что дает возможность существенно сократить сроки проектирования и создания проектной документации. Трехмерная модель может быть эффективна при сравнении различных компоновок сооружений, проведении расчетов сметной стоимости строительства (определение объемов бетонных и земляных работ), позволяет повысить качество проекта.

Работа выполняется в рамках ГК 02.740.11.07.50 по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». На представленный здесь способ моделирования сооружений и оборудования ГЭС получен патент на изобретение [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И., Соколов Б.А. Исследование неустановившихся режимов в отводящей деривации Понойской ГЭС-1 методами математического моделирования // Аннотации законченных в 1968 г. НИР по гидротехнике. М.: Энергия, 1969.

2. Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И., Соколов Б.А. Математическое обеспечение ЭВМ Наир-2 для гидротехнических расчетов: Учебно-методическое пособие. Л.: Изд-во ЛПИ, 1975. 87 с.

3. Кубышкин Л.И. Методика обоснования параметров турбинных трубопроводов ГЭС с применением динамического программирования: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Л.: Изд-во ЛПИ, 1980.

4. Васильев Ю.С., Виссарионов В.И., Кубышкин Л.И., Соколов Б.А. Математическое обеспечение ЭВМ для гидротехнических расчетов: Учебно-методическое пособие. Л.: ЛПИ, 1982. 84 с.

5. Васильев Ю.С., Виссарионов В.И., Кубышкин Л.И. Решение гидроэнергетических задач на ЭВМ

(элементы САПР и АСНИ). М.: Энергоатомиздат, 1987. 160 с.

6. **Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И.** Компьютерные технологии проектирования гидроэнергетических объектов // Сб. науч. тр. СПбГТУ. Энергетика, гидротехника. 1998. №475. С. 32–42.

7. **Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И.** Автоматизация проектирования гидроэнергетических объектов / СПб, ОАО «НПО ЦКТИ» // Турбиностроение: Труды ЦКТИ. 2002. Вып. 290. С. 15–23.

8. **Елистратов В.В., Кубышкин Л.И., Светозарская С.В.** Компьютерные, сетевые и информационные технологии. Расчет турбинных водоводов ГЭС: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 56 с.

9. **Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И., Морозов О.С.** Разработка чертежей зданий ГЭС методом пространственного компьютерного моделирования // Гидротехническое строительство. 1998. №11. С. 7–11.

10. **Кубышкин Л.И.** Автоматизация проектирования объектов возобновляемой энергетики. Ч.1. Разработка проектной графической документации: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 136 с.

11. **Елистратов В.В., Кубышкин Л.И.** Моделирование основных сооружений ГАЭС // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: Тезисы докладов научно-техн. конф. СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2005.

12. **Васильев Ю.С., Елистратов В.В., Кубышкин Л.И.** Моделирование энергетических сооружений ГАЭС // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 11–17.

13. **Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И., Кудряшева И.Г.** Компьютерные технологии в научных исследова-

ниях и проектировании объектов возобновляемой энергетики: учеб. пособие / Под общ. ред. Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 262 с.

14. **Кубышкин Л.И., Светозарская С.В.** Параметрическое моделирование объектов возобновляемой энергетики // Научно-технические ведомости СПбГПУ Сер.: Наука и образование. 2010. № 4(110). С. 42–50.

15. Использование водной энергии: Учебник для вузов / Под ред. Ю. С. Васильева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1995. 608 с.

16. **ОСТ 108.023.14–84.** Профили лопаток направляющего аппарата гидравлических вертикальных поворотно-лопастных и радиально-осевых турбин. Типы и размеры.

17. **ОСТ. 108.023.11–80.** Камеры спиральные металлические гидравлических вертикальных турбин. Очертания проточной части. Размеры.

18. Гидроэнергетическое и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций: Справочное пособие. В 2 т. / Под. ред. Ю.С. Васильева, Д.С. Щавелева. М.: Энергоатомиздат, 1988. 400 с.

19. **Баденко В.Л.** Геоинформационные технологии для решения задач природообустройства: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. 147 с.

20. **Патент на изобретение № 2473128.** Способ параметрического трехмерного моделирования оборудования и сооружений гидроэнергетических объектов / Васильев Ю.С., Елистратов В.В., Кубышкин Л.И., Светозарская С.В. Патентообладатель: ФБГОУ ВПО Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 января 2013 г.

REFERENCES

1. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I., Sokolov B.A.** Issledovaniye neustanovivshikhsya rezhimov v otvodyashchey derivatsii Ponoyskoy GES-1 metodami matematicheskogo modelirovaniya. *Annotatsii zakonchennykh v 1968g. NIR po gidrotekhnike*. М.: Energiya, 1969. (rus.)

2. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I., Sokolov B.A.** Matematicheskoye obespecheniye EVM Nairi-2 dlya gidrotekhnicheskikh raschetov: Uchebno-metodicheskoye posobiye. Leningrad: Izd-vo LPI, 1975. 87 s. (rus.)

3. **Kubyshkin L.I.** Metodika obosnovaniya parametrov turbinnyykh truboprovodov GES s primeneniym dinamicheskogo programmirovaniya: Avtoreferat diss ... kand. techn. nauk / LPI, 1980. (rus.)

4. **Vasilyev Yu.S., Vissarionov V.I., Kubyshkin L.I., Sokolov B.A.** Matematicheskoye obespecheniye EVM dlya gidrotekhnicheskikh raschetov: Uchebno-metodicheskoye posobiye. Leningrad: Izd-vo LPI, 1982. 84 s. (rus.)

5. **Vasilyev Yu.S., Vissarionov V.I., Kubyshkin L.I.** Resheniye gidroenergeticheskikh zadach na EVM (ele-

menty SAPR i ASNI). М.: Energoatomizdat, 1987, 160 s. (rus.)

6. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I.** Kompyuternyye tekhnologii proyektirovaniya gidroenergeticheskikh obyektov. *Sbornik nauchnykh trudov SPbGTU. Energetika, gidrotekhnika*. 1998. №475. S. 32–42. (rus.)

7. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I.** Avtomatizatsiya proyektirovaniya gidroenergeticheskikh obyektov. *Turbinostryeniye: Trudy TsKTI*. Вып. 290 / СПб, ОАО «НПО ЦКТИ», 2002. (rus.)

8. **Yelistratov V.V., Kubyshkin L.I., Svetozarskaya S.V.** Kompyuternyye, setevyye i informatsionnyye tekhnologii. Raschet turbinnyykh vodovodov GES: ucheb. posobiye. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta. 2011. 56 s. (rus.)

9. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I., Morozov O.S.** Razrabotka chertezhey zdaniy GES metodom prostranstvennogo kompyuternogo modelirovaniya. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 1998. №11. S. 7–11. (rus.)

10. **Kubyshkin L.I.** Avtomatizatsiya proyektirovaniya obyektov vozobnovlyayemoy energetiki. Ch.1. Razrabotka proyektnoy graficheskoy dokumentatsii: Uchebnoye posobiye. Sankt-Peterburg: Izd-vo SPbGPU, 2003. 136 s. (rus.)

11. **Yelistratov V.V., Kubyshkin L.I.** Modelirovaniye osnovnykh sooruzheniy GAES. *Gidroenergetika. Novyye razrabotki i tekhnologii. Tezisy dokladov nauchno-techn. konf.* SPb.: Izd-vo VNIIG im. B.Ye.Vedeneyeva, 2005. (rus.)

12. **Vasilyev Yu.S., Yelistratov V.V., Kubyshkin L.I.** Modelirovaniye energeticheskikh sooruzheniy GAES. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2007. № 5. S. 11–17. (rus.)

13. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I., Kudryasheva I.G.** Kompyuternyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh i proyektirovaniy obyektov vozobnovlyayemoy energetiki: Ucheb. posobiye / Pod obshch. red. Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. 262 s. (rus.)

14. **Kubyshkin L.I., Svetozarskaya S.V.** Parametricheskoye modelirovaniye obyektov vozobnovlyayemoy energetiki. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Ser.: Nauka i obrazovaniye*. 2010. № 4(110). S. 42–50. — SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta. 2010. (rus.)

15. Ispolzovaniye vodnoy energii: Uchebnik dlya vuzov / Pod red. Yu.S. Vasilyeva. 4-ye izd., pererab. i dop. M.: Energoizdat, 1995. 608 s. (rus.)

16. **OST 108.023.14–84.** Profili lopatok napravlyayushchego apparata gidravlicheskikh vertikalnykh povorotno-lopastnykh i radialno-osevykh turbin. Tipy i razmery. (rus.)

17. **OST 108.023.11–80.** Kamery spiralnyye metallicheskiye gidravlicheskikh vertikalnykh turbin. Oчерtaniya protochnoy chasti. Razmery. (rus.)

18. Gidroenergeticheskoye i vspomogatelnoye oborudovaniye gidroelektrostantsiy: Spravochnoye posobiye. V 2 t. / Pod. red. Yu.S. Vasilyeva, D.S. Shchaveleva. M.: Energoatomizdat, 1988. 400 s. (rus.)

19. **Badenko V.L.** Geoinformatsionnyye tekhnologii dlya resheniya zadach prirodoobustroystva: Ucheb. posobiye. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2013. 147 s. (rus.)

20. **Patent RF na izobreteniyе № 2473128.** Sposob parametricheskogo trekhmernogo modelirovaniya oborudovaniya i sooruzheniy gidroenergeticheskikh obyektov / Vasilyev Yu.S., Yelistratov V.V., Kubyshkin L.I., Svetozarskaya S.V. Patentobladatel: FBGOU VPO. Zaregistrirvano v Gosudarstvennom reyestre izobreteniy Rossiyskoy Federatsii 20 yanvarya 2013 g. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — академик РАН доктор технических наук президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: president@spbstu.ru

КУБЫШКИН Леонид Иванович — кандидат технических наук профессор кафедры водохозяйственного и гидротехнического строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kubishkin@cef.spbstu.ru

AUTHORS

VASIL'EV Yuriy S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petesburg, Russia; e-mail: president@spbstu.ru

KUBYSHKIN Leonid I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petesburg, Russia; e-mail: kubishkin@cef.spbstu.ru



УДК 621.313.333

Н.А. Кальм, Е.А. Николаева, А.Н. Беляев

УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОПОРШНЕВЫМИ АГРЕГАТАМИ В УСЛОВИЯХ РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

N.A. Kalm, E.A. Nikolaeva, A.N. Belyaev

GAS ENGINE POWER PLANT CONTROL IN ELECTRIC SYSTEM WITH ABRUPTLY VARIABLE LOAD

Рассмотрены вопросы динамической устойчивости и регулирования мощности нагрузки в электрической системе, которая осуществляет электроснабжение промышленной площадки с большой долей электродуговых плавильных печей и имеет газопоршневые агрегаты и генераторы, соизмеримые по мощности с нагрузкой. Показано, что автономная работа газопоршневой электростанции в условиях рассматриваемой энергосистемы невозможна, поскольку не обеспечивается поддержание в допустимых пределах основных режимных параметров. При параллельной работе газопоршневой электростанции с мощной энергосистемой мгновенные броски мощности нагрузки, вызванные пуском сталеплавильного и ферросплавного производств, полностью компенсируются изменениями потребляемых из системы активной и реактивной мощностей, в то время как регулятор частоты вращения ГПА «отрабатывает» лишь электро-механический переходный процесс, связанный с медленными увеличениями мощности печной, двигательной и другой нагрузки.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА; СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ И ФЕРРОСПЛАВНОЕ ПРОИЗВОДСТВА; ГАЗОПОРШНЕВОЙ АГРЕГАТ; РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ; КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ; ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ.

The issues of transient stability and gas engine power control in electric system with large part of induction melting furnace are considered in the paper. It is shown that autonomous (island) operation in such conditions does not satisfy the requirements of power quality standards. Parallel operation with large-scale power system allows to damp the fluctuation of induction melting furnace power, since gas engine frequency control works out with slow load oscillations only, e.g. induction motor starts.

POWER SYSTEM; STEEL AND FERRONICKEL SMELTING PLANT; GAS ENGINE POWER PLANT; FREQUENCY CONTROL; POWER QUALITY; TRANSIENT STABILITY.

В статье рассматриваются вопросы динамической устойчивости и регулирования мощности нагрузки в электрической системе, которая осуществляет электроснабжение промышленной площадки с большой долей электродуговых плавильных печей и имеет газопоршневые агрегаты и генераторы, соизмеримые по мощности с нагрузкой.

Газопоршневые агрегаты (ГПА) — на сегодняшний день одни из наиболее высокоманевренных приводных механизмов. Это позволяет рекомендовать их, например, в качестве основных для питания автономных электроэнергети-

ческих систем (ЭЭС) нефтедобывающих комплексов [1].

Механическая инерционная постоянная ГПА обычно находится в пределах 1,5–3,5 с. Это означает, что за данное время происходит изменение вырабатываемого агрегатом крутящего момента на валу от нуля до номинального значения. Традиционно основной нагрузкой нефтедобывающих комплексов являются асинхронные двигатели (АД), мощность которых соизмерима с мощностью генераторов. Их пуски могут быть чрезвычайно тяжелыми переходными процессами [2, 7], однако в силу примерного

равенства механических инерционных постоянных двигателей и генераторов длительность изменения создаваемого агрегатом (агрегатами) крутящего момента на валу сопоставимо с длительностями пусков АД.

Одной из основных нагрузок рассматриваемой промплощадки являются электродуговые плавильные печи, у которых характер изменения потребляемой активной и реактивной мощности существенно отличается от процессов при обычных пусках. Реальные измерения показывают, что за промежуток времени около 1,5 с может произойти до шести циклов полного сброса и последующего набора мощности печи. Механическая система ГПА за этот промежуток сможет отработать один набор или сброс мощности (но не цикл «сброс — набор»). Фактически за время 0,03–0,05 с успевает произойти только выдача сигнала регулятора частоты вращения на исполнительный механизм (то есть, на изменение положения дроссельной заслонки, регулирующей поток газозоудшной смеси во впускной коллектор).

Поэтому вопросы поддержания в допустимых пределах основных режимных параметров ЭЭС и обеспечения требуемого уровня динамической устойчивости — чрезвычайно важная задача, которая решается корректным выбором схемы выдачи мощности станции, ее элементов, а также настроечных параметров систем

регулирования. В нашей работе задача решается на основе компьютерного моделирования в виде простейших эквивалентов и учетом физических особенностей протекающих в них переходных процессов (сталеплавильное производство, ферросплавный завод, асинхронная двигательная нагрузка и т. д.).

Моделирование газопоршневого агрегата и оптимизация его параметров при регулировании частоты

Основной элемент модели газопоршневого агрегата — система управления частотой вращения (номинальное значение 500 об/мин), построенная на базе известной схемы ПИД-регулятора Woodward и представленная на рис. 1 [3]. Для оптимизации режимов работы и переходных процессов используются соответствующие коэффициенты по отклонению, производной и интегралу некоторого параметра (соответственно P , D и I ; в нашем случае — по частоте), а также величина статизма регулирования (коэффициент $D_{\text{гоор}}$ на рис. 1, a). Исходные значения этих параметров, предоставленные производителем: $P = 0,5$; $D = 0,054$; $I = 0,8$ и $D_{\text{гоор}} = 0,05$. Причем постоянная времени общего канала регулирования $tf1$ (или τ_d на рис. 1, b) равна $0,2D$.

Суммарный сигнал управления подается на вход модели исполнительного механизма — ГПА

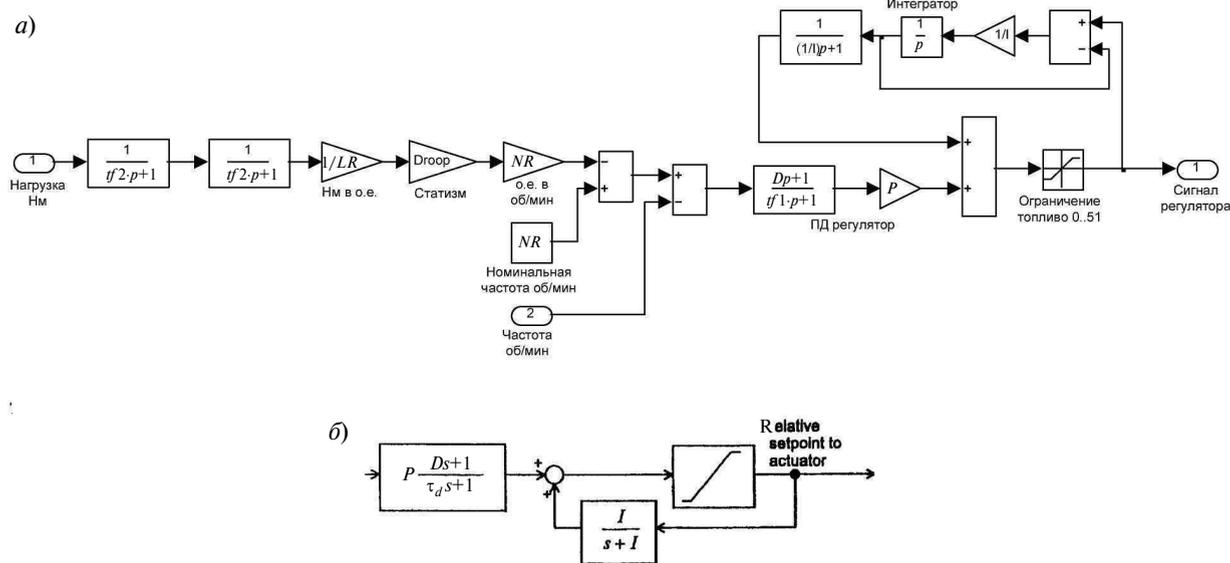


Рис. 1. Модель системы управления газопоршневого агрегата (а) на основе схемы ПИД-регулятора Woodward (б)

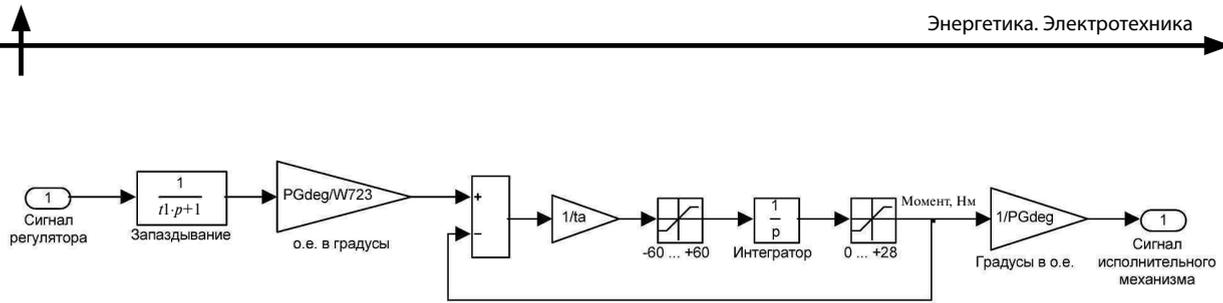


Рис. 2. Модель исполнительного механизма (ГПА)

(рис. 2), представляющей собой два инерционных звена с постоянными времени t_1 и t_a , которые моделируют преобразование сигнала регулятора и перемещение дроссельной заслонки в газоздушном смесителе. На эти сигналы накладываются соответствующие ограничения: $(-60) - 60$ и $0 - 28$, после чего они преобразуются в механический момент агрегата, который используется в уравнении движения ротора.

Такого рода модели в форме передаточных функций с ограничениями повсеместно используются при расчетах больших возмущений в энергосистемах применительно ко всем типам агрегатов (паровые турбины, дизельные установки, газотурбинные агрегаты и т. д.). Более корректный вариант предполагает запись дифференциальных уравнений в форме «давление — температура — объем» для каждого элемента ГПА (смеситель, система охлаждения, впускной коллектор, цилиндр, выпускной коллектор). Вместе с тем данные о параметрах этих элементов для рассматриваемого агрегата мощностью 18 МВт,

а также результаты натурных испытаний для верификации моделей пока отсутствуют.

Рассмотрим тестовые кривые поведения газопоршневого агрегата без генератора при подаче в качестве нагрузки (электромагнитный момент генератора) различных ступенчатых воздействий в соответствии со стандартом ISO 8528-5. Нагрузка в этом случае увеличивается последовательно на величину 33, 23, 19 % ($0\% \rightarrow 33\% \rightarrow 56\% \rightarrow 75\%$) и затем снижается до нуля. Реакция системы в виде изменения скорости вращения агрегата, об/мин, представлена на рис. 3.

Исходным данным производителя соответствуют сплошные кривые на рис. 3. В этом случае обеспечивается достаточно хорошее качество переходного процесса, полная длительность которого не превышает 3–4 с. Однако значительные провалы частоты вращения ГПА в начале переходного процесса и отклонения от номинального значения в установившихся режимах работы показывают необходимость

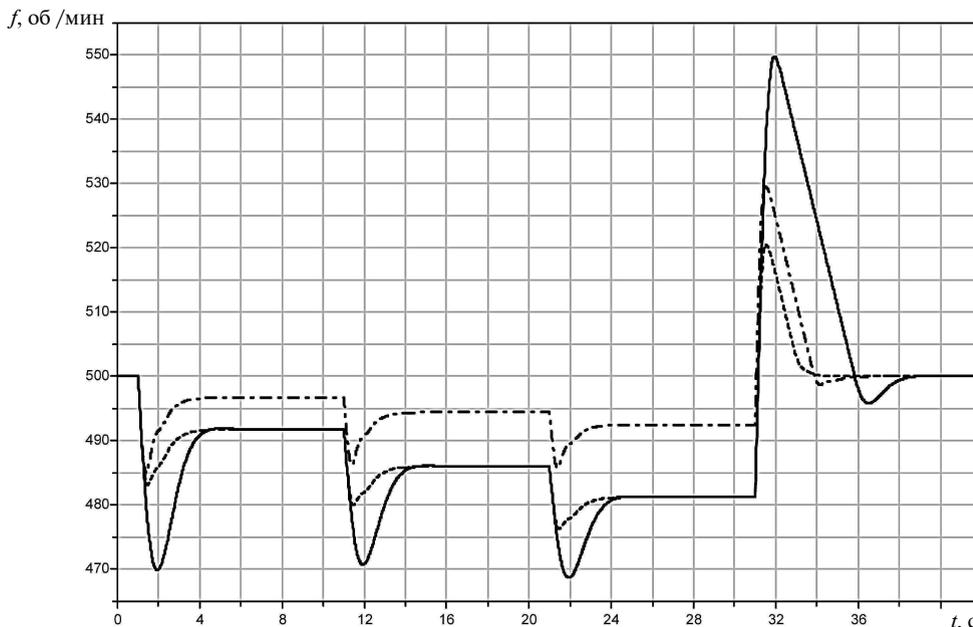


Рис. 3. Изменение частоты вращения агрегата в различных режимах нагрузки

оптимизации настроечных параметров ПИД-регулятора Woodward.

В первую очередь, были изменены величины указанных коэффициентов ($P = 1$; $D = 0,2$; $I = 1,2$). Этим параметрам соответствуют пунктирные кривые на рис. 3. Дальнейшее повышение коэффициентов нецелесообразно ввиду развития колебательных процессов, что приведет к повышению расхода топлива. И, наконец, штрихпунктирным кривым отвечает опыт снижения общего статизма регулирования с 5 до 2 % ($D_{\text{доп}} = 0,02$). Некоторое увеличение начального провала частоты компенсируется существенно меньшим отклонением от номинального значения в установившихся режимах при различных нагрузках фактически во всем диапазоне от нуля до номинальной мощности. Эта переменная ($D_{\text{доп}}$) будет варьироваться и в дальнейшем для получения оптимального распределения мощностей в модели ЭЭС между газопоршневой станцией (ГПЭС) и эквивалентным генератором системы.

Анализ протекания переходных процессов при колебаниях мощности нагрузки в автономной энергосистеме

Для качественного анализа протекания переходных процессов в электроэнергетической системе с ГПА рассмотрим две простейшие модели, представленные на рис 4.

Все вычисления здесь и далее произведены в относительных единицах, причем за базисные величины приняты напряжение $U_{\text{баз}} = 110$ кВ и мощность $S_{\text{баз}} = 12 \cdot 22,901$ МВА. Графики взаимных углов между роторами эквивалентных синхронных машин даны в радианах, остальные — в относительных единицах.

В первом случае (рис. 4, а) оценивается качество переходных процессов в автономной си-

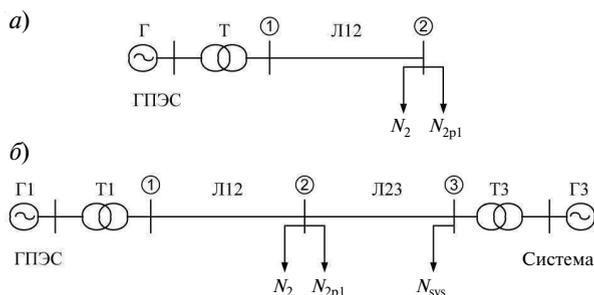


Рис. 4. Простейшие модели ЭЭС для исследования устойчивости

стеме при питании резкопеременной нагрузки только от ГПЭС с двенадцатью однотипными агрегатами по 18 МВт каждый. Индуктивное сопротивление линии электропередачи Л12 принято равным 0,02 о.е. Во втором случае (рис. 4, б) рассматривается схема с двухсторонним питанием как от ГПЭС, так и от большой ЭЭС, эквивалентированной мощными (3 800 МВА) генератором Г3 и нагрузкой N_{sys} . Индуктивные сопротивления ЛЭП Л12 и Л23 приняты 0,02 и 0,07 о.е., соответственно. Параметры синхронного генератора: $J = 21300$ кг·м²; $x_d = 2,543$; $x_q = 1,277$; $x'_d = 0,436$; $x''_d = 0,261$; $x''_q = 0,298$; $r_a = 0,005173$; $x_s = 0,15$; $r_f = 0,008539$; $r_{rd} = 0,0490977$; $r_{rq} = 0,0291147$ (все сопротивления — в о. е.).

Максимальная суммарная нагрузка в обоих случаях равна 0,8 о.е. и представлена в виде двух составляющих — постоянной проводимости (N_2) 0,4 о.е. и переменной проводимости (N_{2pl}), моделирующей работу дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Колебания ее активной и реактивной мощности получены в результате реальных измерений и представлены на рис. 5.

Поведение регулируемого вращающего момента на валу ГПА (рис. 6, а) в автономной системе (рис. 4, а) соответствует огибающей кривой изменения резкопеременной нагрузки, поскольку, как уже было отмечено выше, постоянные времени механической системы агрегата и электрической цепи, образующейся в процессе плавки, существенно различаются.

Отсутствие дополнительного источника питания в такой схеме приводит к недопустимым колебаниям частоты в ЭЭС и — особенно — напряжения на шинах нагрузки (рис. 6, б). Последние составляют до 30 % от номинальной величины (от 0,83 до 1,12 о.е.). Колебания частоты могут быть до некоторой степени сглажены работой системы управления ГПА. Однако регулирование мгновенных изменений напряжения в указанном диапазоне представляет собой практически невыполнимую задачу, поскольку и регулятор возбуждения генератора, и статический тиристорный компенсатор (СТК) также обладают некоторыми собственными запаздываниями.

Например, постоянная времени возбудителя генераторов автономных ЭЭС согласно исходным данным производителей оборудования составляет $T_e = 0,2-0,4$ с, а постоянная времени

системы регулирования СТК — не менее 0,05 с. Это означает, что среднее значение напряжения может быть несколько стабилизировано, однако мгновенные (за 0,01–0,02 с) броски напряжения останутся без изменений.

Кроме того, в автономной системе существенно возрастают нагрузки на механическую систему валопровода агрегата из-за постоянных и достаточно больших небалансов моментов, и это в конечном счете может привести к его поломке [4, 8].

Дополнительно (здесь не показаны) были рассмотрены случаи *минимально возможных* колебаний нагрузки сталеплавильного (пуск одной из двух печей мощностью 19 МВА) и ферросплавного (совместно с предыдущим пуск одной из четырех печей мощностью 20 МВА) производств. Было отмечено, что во всех указанных случаях колебания напряжения и частоты также являются недопустимыми в соответствии с существующей нормативной базой.

Анализ протекания переходных процессов, связанных с колебаниями мощности нагрузки, при параллельной работе с энергосистемой большой мощности

Работа газопоршневой электростанции параллельно с мощной энергосистемой (рис. 4, б) существенно отличается с точки зрения колебаний основных режимных параметров ЭЭС. В качестве эквивалента энергосистемы используется пара «генератор — нагрузка» (мощность 13,8 о.е.). Параметры эквивалентного генератора пропорциональны соотношению мощностей 12 генераторов ГПЭС и короткого замыкания

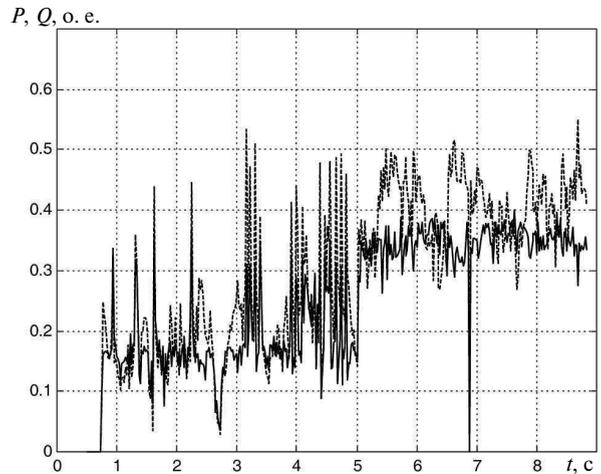
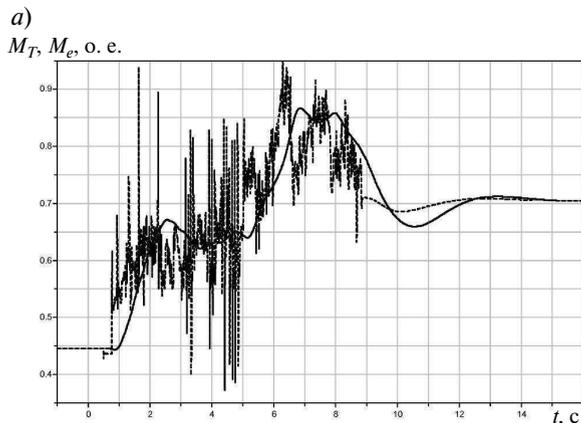


Рис. 5. Колебания активной (сплошная) и реактивной (пунктир) мощностей сталеплавильной печи, соответствующие началу процесса плавки

реальной системы в сети 110 кВ ($I_{K3} \approx 20$ кА) и равны следующим (все сопротивления — в о. е.): $x_d = 0,13479$; $x_q = 0,13479$; $x'_d = 0,021751$; $x''_d = 0,016854$; $x''_q = 0,016854$; $r_a = 0,00037308$; $x_s = 0,013991$; $r_f = 6,5196 \cdot 10^{-0,005}$; $r_{rd} = 0,00026598$; $r_{rq} = 0,00019977$; $T_j = 97$ с; $\sigma = 4,75$ %.

Вопрос оптимального распределения нагрузки между двумя генераторами с целью максимального использования установленной мощности проектируемой электростанции находится в некотором противоречии с требованием отстройки коэффициентов регулирования ГПА до значений, при которых система управления не реагировала бы на мгновенные броски мощности сталеплавильных печей. Как известно, регуляторы турбин крупных станций имеют

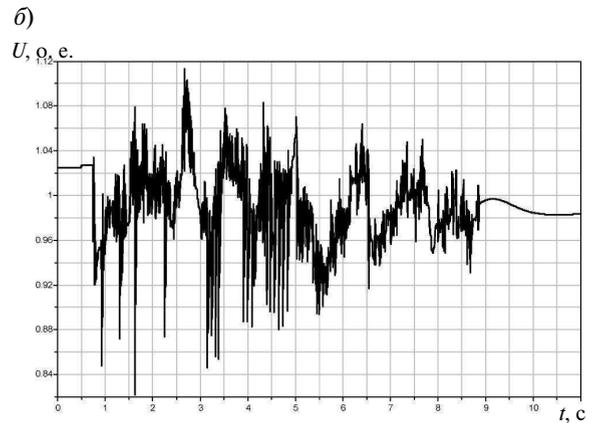


Рис. 6. Механический (сплошная) и электромагнитный (пунктир) моменты на валу ГПА (а), а также колебания напряжения на шинах нагрузки (б) в переходных процессах при работе в автономной системе

статизм регулирования 4–6 % на тепловых станциях и 2–6 % на гидростанциях. Таким образом, статизм регулирования генератора ГПЭС в рассматриваемой простейшей модели должен быть принят меньшим указанных величин. В данном опыте коэффициент статизма ГПА выбран $Droop = 0,01$ (1 %), однако при распределении мощности между пятью или десятью машинами в реальной модели это требование может быть несколько ослаблено. Установившиеся значения токов по линиям (рис. 7, *a*) от ГПЭС (Л12) и системы (Л23) в начальный момент времени косвенно показывают получающееся распределение мощности.

Мощность нагрузки сталеплавильной печи (в модели — эквивалент N_{2_pl}) изменяется аналогично предыдущему опыту в соответствии

с графиками, представленными на рис. 5. Наиболее качественно процесс поглощения колебаний данной нагрузки происходит в случае, показанном на рис. 7, *a* в виде кривых изменения токов по линиям. Большие мгновенные изменения сопротивления печи отрабатываются почти исключительно за счет перераспределения режимных параметров мощной (3 800 МВА) электроэнергетической системы.

Это означает, что колебания напряжения на шинах рассматриваемой нагрузки (рис. 8, *a*) даже в отсутствие дополнительных средств регулирования реактивной мощности (например, СТК) будут находиться в пределах 5 % от номинальной величины [6, 9, 10]. Существенно снижены в этом случае и колебания частоты (рис. 8, *б*).

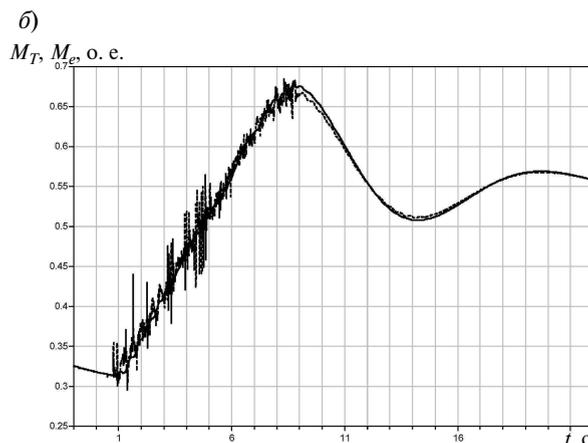
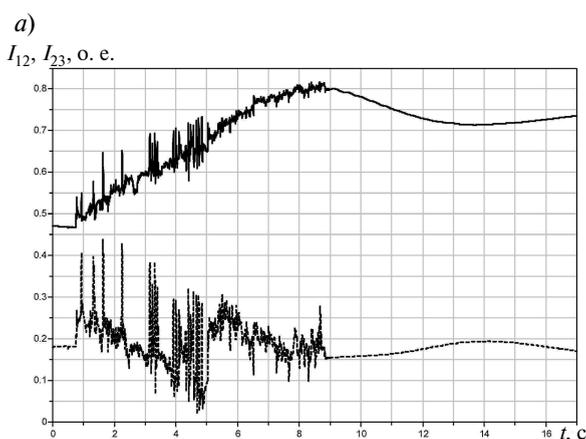


Рис. 7. Изменения токов по линиям от ГПЭС (Л12, сплошная) и системы (Л23, пунктир), при компенсации резкопеременной нагрузки (*a*), а также кривые переходных процессов механического (сплошная) и электромагнитного (пунктир) моментов на валу ГПА (*б*) при его работе параллельно с энергосистемой

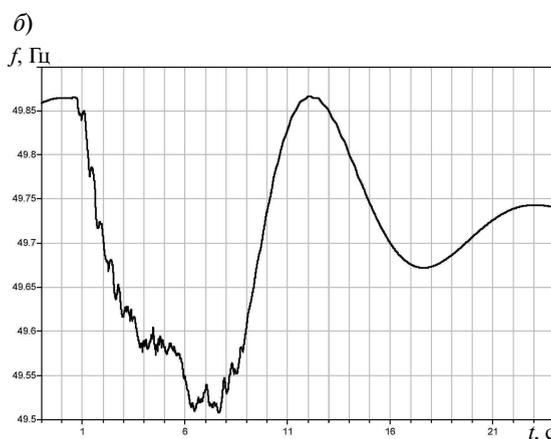
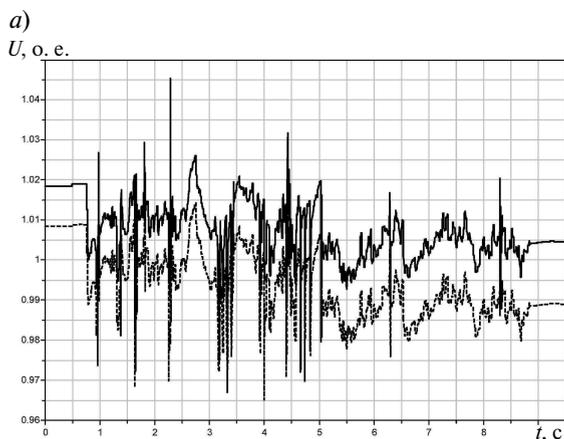


Рис. 8. Напряжения на шинах ГПЭС и нагрузки (*a*), а также колебания частоты (*б*) при наличии резкопеременной нагрузки в условиях параллельной работы с ЭЭС

Возрастание мощности нагрузки к концу переходного процесса начала плавки (установившиеся значения токов на рис. 7, а в момент времени 16 с) постепенно распределяется на газопоршневой агрегат (рис. 7, б). Таким образом, мощная электроэнергетическая система служит своеобразным демпфером колебаний нагрузки в начале процесса плавки при загорании дуги, опускании электродов (с возможным касанием их загруженной шихты) и при так называемом «проплавлении колодцев».

Несмотря на весьма низкую величину механической инерционной постоянной ГПА, обеспечение их динамической устойчивости при параллельной работе с системой не представляет каких-либо трудностей даже в случае значительных возмущений в режиме максимальной нагрузки, поскольку регулятор частоты вращения достаточно быстро отрабатывает возникающие небалансы мощности, разгружая агрегат в аварийной ситуации и снижая его крутящий момент практически до нуля, а затем, при восстановлении нормальной работы ЭЭС, увеличивает его обратно вплоть до номинального значения.

Нарушение динамической устойчивости происходит лишь при максимально возможных воз-

мущениях III группы, то есть при трехфазных коротких замыканиях на шинах станции длительностью 0,18 с отказом выключателя и действием устройств резервирования отказа выключателя (УРОВ) через 0,3 с [5, 6]. Оно проявляется в виде одного или нескольких асинхронных проворотов ротора ГПА относительно эквивалентного генератора мощной ЭЭС (рис. 9).

В результате проведенной работы установлено следующее.

Автономная работа газопоршневой электростанции в условиях рассматриваемой энергосистемы с резкопеременной нагрузкой (сталеплавильное/ферросплавное производства) невозможна, поскольку поддержание в допустимых пределах основных режимных параметров не обеспечивается.

Работа ГПЭС параллельно с мощной энергосистемой существенно отличается от автономной с точки зрения должного управления основными режимными параметрами. Практически мгновенные (0,01–0,02 с) броски мощности нагрузки компенсируются изменениями токов системы, в то время как регулятор частоты вращения ГПА отрабатывает лишь огибающую кривой резкопеременной мощности нагрузки, то есть обычный

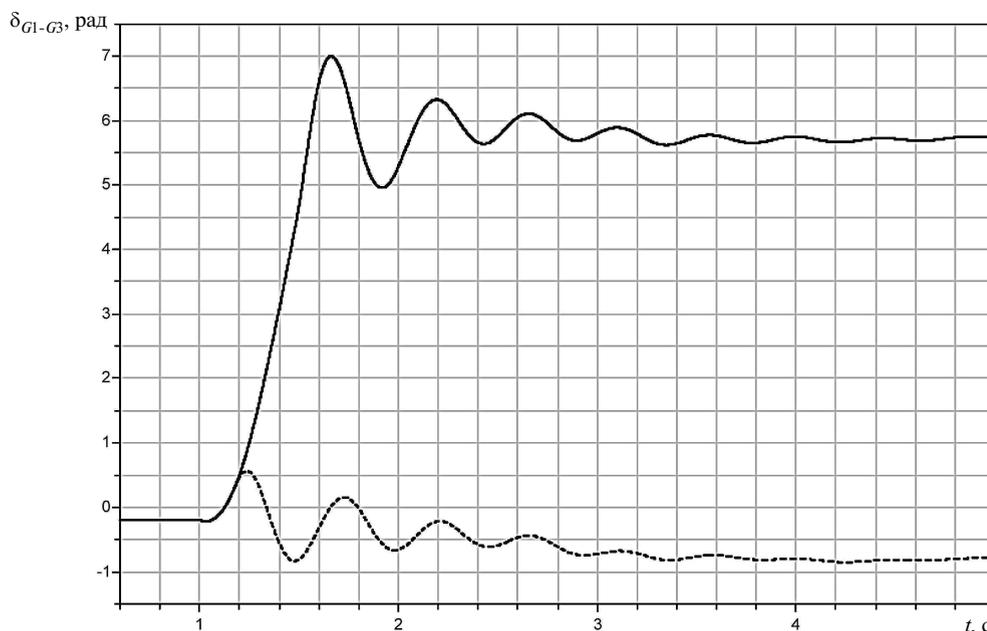


Рис. 9. Динамический процесс системы (взаимный угол между роторами ГПА и эквивалентного генератора системы) при возмущениях I (0,18 с) и III (0,48 с) групп

электромеханический переходный процесс, связанный с постепенным увеличением мощности, потребляемой сталеплавильной печью и другой более медленно изменяющейся, например асинхронной, нагрузкой.

Динамическая устойчивость простейших эквивалентных моделей ЭЭС сохраняется при возмущениях I и II группы и нарушается при возмущениях III группы, однако даже и в этих случаях полное восстановление режимных параметров происходит в течение 2–3 с.

Нарушение динамической устойчивости при максимально возможных возмущениях III группы (трехфазное КЗ на шинах станции длительностью 0,18 сек с отказом выключателя и действием УРОВ через 0,3 сек) заключается только в появлении одного асинхронного проворота ротора ГПА относительно эквивалентного генератора мощной ЭЭС благодаря чрезвычайно быстрой работе системы регулирования частоты и малому значению механической инерционной постоянной агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдинер А.Я., Цыпкин М.И., Бондаренко В.В. Газопоршневые электроагрегаты. СПб.: Галлея Принт, 2006. 240 с.

2. Беляев А.Н., Кальм Н.А., Смоловик С.В. Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей в автономных электроэнергетических системах с газопоршневыми агрегатами // *Электрика*. 2012. № 11. С. 30–35.

3. Беляев А.Н., Епифанова О.В., Смоловик С.В. Регулирование синхронных генераторов с дизельным приводом // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2006. № 5(46). Т. 1. С. 74–79.

4. Беляев А.Н. Снижение скручивающих моментов в системе газотурбинного привода генераторов автономной электростанции // *Известия РАН. Энергетика*. 2010. № 2. С. 124–132.

5. Методические указания по устойчивости энергосистем. М.: Изд-во ЭНАС, 2005. 16 с.

6. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005. 407 с.

7. Герасимов С.Е., Масленников В.А., Смоловик С.В.

Исследование влияния параметров асинхронного электродвигателя на электромеханические и электромагнитные переходные процессы // «Переходные процессы и условия работы оборудования электрических систем». Труды ЛПИ. № 380. Л.: Изд-во ЛПИ, 1981. С. 18–21.

8. Беляев А.Н., Смирнов А.А., Смоловик С.В. Демпфирование составляющих крутильных колебаний в автономных энергосистемах с преобладающей двигательной нагрузкой за счет «сильного» регулирования устройств продольной емкостной компенсации // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. Казань, 2011. № 7–8. С. 71–82.

9. Беляев А.Н., Андрус С.Т. Управляемые источники реактивной мощности для обеспечения устойчивости узлов нагрузки нефтегазодобывающих комплексов // *Научно-технические ведомости СПбГТУ*. 2008. №1 (53). С. 92–97.

10. Беляев А.Н., Ивановский Р.И., Карпов Ю.Г., Сотников К.А. Smart grid. Разработка приложений // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2011. №6(138). Т. 1. С. 115–121.

REFERENCES

1. Gol'diner A.Ya., Tsyarkin M.I., Bondarenko V.V. Gazoporzshnevyye elektroagregaty. SPb.: Galleia Print, 2006. 240 s. (rus.)

2. Belyaev A.N., Kal'm N.A., Smolovik S.V. Issledovanie puskovykh rezhimov asinkhronnykh dvigateley v avtonomnykh elektroenergeticheskikh sistemakh s gazoporzshnevymi agregatami. *Elektrika*. 2012. № 11. S. 30–35. (rus.)

3. Belyaev A.N., Epifanova O.V., Smolovik S.V. Regulyrovaniye sinkhronnykh generatorov s dizel'nyim privodom. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2006. № 5, T. 1. S.74–79. (rus.)

4. Belyaev A.N. Snizheniye skrudivaiushchikh momentov v sisteme gazoturbinnogo privoda generatorov

avtonomnoi elektrostantsii. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2010. № 2. S. 124–132. (rus.)

5. Metodicheskie ukazaniya po ustoychivosti energosistem. M.: Izd-vo ENAS, 2005. 16 s. (rus.)

6. Gurevich Yu.E., Kabikov K.V. Osobennosti elektro-snabzheniya, orientirovannogo na bespereboynuyu rabotu promyshlennogo potrebitelia. M.: ELEKS-KM, 2005. 407 s. (rus.)

7. Gerasimov S.E., Maslennikov V.A., Smolovik S.V. Issledovanie vliianiya parametrov asinkhronnogo elektrodvigateleya na elektromekhanicheskie i elektromagnitnye perekhodnye protsessy. *Perekhodnye protsessy i usloviya raboty oborudovaniya elektricheskikh sistem: Trudy LPI. № 380*. L.: LPI, 1981. S. 18–21. (rus.)

8. Belyaev A.N., Smirnov A.A., Smolovik S.V. Dämpfungsvorgänge in zusammengesetzten nichtlinearen Schwingungssystemen mit überwiegender Drehmaschinenlast. *Problemy energetiki*. Kazan. 2011. № 7–8. S. 71–82. (rus.)

9. Belyaev A.N., Andrus S.T. Upravlyaemye istochniki

reaktivnoi moshchnosti dlya obespecheniya ustoichivosti uzlov nagruzki neftegazodobyvaiushchikh kompleksov. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU*. 2008. №1. S. 92–97. (rus.)

10. Belyaev A.N., Ivanovskii R.I., Karpov Yu.G., Sotnikov K.A. Smart grid. Razrabotka prilozhenii. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ser.: Informatika, telekommunikatsii, upravlenie.*, 2011. №6(138). Vol. 1. S. 115–121. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛЬМ Наталья Арсеньевна — аспирант кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: natatasha@inbox.ru

НИКОЛАЕВА Елизавета Андреевна — ассистент кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: alize5@inbox.ru

БЕЛЯЕВ Андрей Николаевич — доктор технических наук доцент кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: andrey.belyaev@gmail.com

AUTHORS

KALM Natalya A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: natatasha@inbox.ru

NIKOLAIEVA Elizaveta A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: alize5@inbox.ru

BELIAEV Andrey N. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: andrey.belyaev@gmail.com

УДК 621.314:621.316.7

В.С. Козлов, А.Ф. Синолиций, В.А. Кольсун

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ НА ОСНОВЕ P - Q ТЕОРИИ

V.S. Kozlov, A.F. Sinolitsyy, V.A. Kol'sun

MATHEMATICAL TOOL SYNTHESIS FOR ACTIVE FILTER CONTROL BASED ON IRP P - Q THEORY

В статье предложен математический аппарат выявления неактивных составляющих тока, который можно использовать для управления активными фильтрами по разным критериям оптимальности. Предложены два способа реализации данной стратегии управления активными фильтрами, отличающиеся точностью вычислений. Математические выкладки получены в результате синтеза известных теорий мгновенной мощности. Некоторые формулы представлены в дискретном виде для применения в цифровых вычислительных системах.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ; P - Q ТЕОРИЯ; АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР; КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ; СИММЕТРИРОВАНИЕ ТОКОВ.

Mathematical tool of non-active current components compensation for active filter control is designed. Proposed conception provides active filter control with different compensation strategies. Mathematical tool can be realized in two ways which differ in calculation error and complexity. Proposed mathematical tool is the combination of frequency-base and time-based methods of active filter control. Some formulas are presented in discrete view for using in embedded systems.

ENERGY SAVING TECHNOLOGY; P - Q THEORY; ACTIVE FILTER; REACTIVE POWER COMPENSATION; BALLANSING CURRENTS.

Активные фильтрокомпенсирующие устройства — достаточно эффективное решение задач устранения высших гармоник, регулирования уровня реактивной мощности, улучшения коэффициента мощности, балансирования нагрузки и т. д. [1, 10]. Для управления активными фильтрокомпенсирующими устройствами предложено значительное количество математических аппаратов. Большинство из них может обеспечить работу только по одному критерию оптимальности [7] (например, передача энергии к потребителю с минимумом потерь в сети). Одной из наиболее распространенных теорий, применяемых для управления активными фильтрами, является p - q теория мгновенной мощности, предложенная в [2]. Данная теория имеет ряд недостатков, которые указаны в работах [3–5]. Суть критики этой теории можно свести к факту некорректного определения составляющих

мощности в сети питания при несимметрии и несинусоидальности системы питающего напряжения — в таком случае активный фильтр генерирует в сеть ток коррекции, определенный с ошибкой, [3, 4] и, соответственно, симметрирование фазных токов оказывается невозможным.

Для решения описанных проблем многие ученые предлагают собственные математические аппараты управления активными фильтрами, но также не лишены недостатков.

В данной статье мы предлагаем концепцию управления активными фильтрами тока, объединяющую различные подходы к решению задачи выявления необходимого тока коррекции для сети. Предложенная концепция имеет два варианта реализации, равных по производительности и незначительно отличающихся сложностью реализации в цифровых системах.

Критерии оптимальности

При оптимизации энергетических процессов к устройствам улучшения показателей качества электроэнергии могут предъявлять разные, иногда противоречивые критерии компенсации [7]. Наиболее актуальные из них представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оптимальности при потреблении электроэнергии

| № | Критерий | Формула |
|----|---|---|
| 1. | Передача максимума энергии в нагрузку | $\frac{u}{i} = \frac{U^2}{P} = \text{const}$ |
| 2. | Равномерное потребление энергии [6] | $p = P; t \in [0, T]$ |
| 3. | Симметрирование фазных токов (напряжений) | $\begin{cases} i_A + i_B + i_C = 0; \\ I_A = I_B = I_C \end{cases}$ |
| 4. | Минимизация мгновенных значений тока | $i \leq I_{m \max}$ |

Здесь u, i, p — мгновенные значения соответственно напряжения, тока и мощности; $i_A, i_B, i_C, I_A, I_B, I_C$ — соответственно мгновенные и действующие значения токов фаз A, B, C ; U — действующее значение фазного напряжения; P — активная мощность; t — текущее значение времени.

Критерий № 1 отображает исполнение закона

$$\frac{u}{i} = R = \text{const}, \quad (1)$$

где R — активное сопротивление нагрузки.

Равенство (1) соответствует закону Ома при активном сопротивлении, не зависимом от частоты и времени, то есть, иначе говоря, минимуму потерь энергии при ее передаче от генератора к нагрузке. Здесь выполняется равенство $P=S$, где S — значение полной мощности.

Таким образом, критерий № 1 предполагает и минимизацию реактивной мощности. Под минимизацией реактивной мощности понимается устранение сдвига фаз между одноименными гармониками тока и напряжения в соответствующей фазе (см. табл. 1).

$$U_n \sin(n\omega t + \varphi_n) = k_R I_n \sin(n\omega t + \varphi_n),$$

где U_n, I_n — амплитуды напряжения и тока n -й гармоники; n — порядковый номер гармоники; ω — круговая частота; φ_n — сдвиг фаз n -й гармоники; k_R — коэффициент, соответствующий активному сопротивлению.

Критерий № 1 выполняют устройства, основанные на методе неактивных токов Фризе [8] (например, FBD метод [9]).

Выполнение критерия № 2 обеспечивает равномерное потребление энергии на всем интервале времени T . Критерий № 2 соответствует p - q теории мгновенной мощности [2] и включает частичное исполнение задачи минимизации реактивной мощности. Невозможность симметрирования фазных токов (напряжений) связана с преобразованием обобщенных векторов напряжения и тока из системы координат A, B, C в систему координат α, β . Изначально используемые в p - q теории матрицы преобразований не учитывают нулевую составляющую, которая имеет место в некоторых случаях несимметрии системы напряжений (токов), и предполагают существование только составляющих прямой и обратной последовательностей [6].

Исполнение критерия № 3 в чистом виде может обеспечить, например, теория «СРС» мгновенной мощности, предложенная в [3].

Критерий № 4 накладывает ограничение на максимальное (пиковое) значение мгновенного тока в системе. Его выполнение обеспечивает защиту электротехнического оборудования системы от превышения сигналами заданных уровней.

Рассмотрим математический аппарат предложенной системы управления активным фильтром, учитывая упомянутые выше критерии

Первый режим работы

Имеем трехпроводную систему питания, у которой напряжения в точке подключения активного фильтра насыщены высшими гармониками, а сдвиг фаз между гармониками основной частоты сигналов напряжения не равен 120° :

$$\begin{aligned} u_A &= \sum_{n=1}^{\infty} U_{mAn} e^{j\varphi_{An}}; \\ u_B &= \sum_{n=1}^{\infty} U_{mBn} e^{j\varphi_{Bn}}; \end{aligned}$$

$$u_C = \sum_{n=1}^{\infty} U_{mCn} e^{j\varphi_{Cn}},$$

где u_A, u_B, u_C — соответственно напряжения фаз A, B, C ; $U_{mA n}, U_{mB n}, U_{mC n}$ — амплитуды n -х гармоник фазных напряжений фаз A, B, C ; $\varphi_{A n}, \varphi_{B n}, \varphi_{C n}$ — углы сдвига n -х гармоник сигнала напряжения фаз A, B, C .

Для выполнения критериев № 2, 3 задача коррекции сводится к определению вектора прямой последовательности напряжения трехфазной системы. Его можно найти следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{correct} = \\ = \frac{U_{mA1} e^{j\varphi_{A1}} + U_{mB1} e^{j\left(\varphi_{B1} + \frac{4}{3}\pi\right)} + U_{mC1} e^{j\left(\varphi_{C1} + \frac{2}{3}\pi\right)}}{3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $U_{correct}$ — обобщенный вектор напряжения сети.

Вышеупомянутый вектор $U_{correct}$ в системе координат α, β будет выглядеть так:

$$\begin{cases} u_{f\alpha} = \text{Im}(\vec{U}_{correct}); \\ u_{f\beta} = \text{Re}(\vec{U}_{correct}), \end{cases} \quad (3)$$

где $u_{f\alpha}, u_{f\beta}$ — проекции обобщенного вектора напряжения сети на оси ортогональной неподвижной системы координат α, β .

Отметим, что при симметрировании фазных токов в условиях несимметричного (по вине энергогенерирующей организации) напряжения (см. критерий № 3 в табл. 1) невозможно добиться полного устранения реактивной мощности в классическом ее понимании (по определению Videanu) и равномерности потребления энергии из трехфазной системы.

Для реализации выражений (2) и (3) в дискретном виде предлагается использовать дискретное преобразование Фурье для первой гармоники. Такое решение даст возможность исключить влияние высших гармоник напряжения в питающей сети.

Таким образом, первый шаг усовершенствованной системы — определение проекций вектора прямой последовательности напряжения $U_{correct}$ на оси ортогональной неподвижной системы α, β (3). Представив вектор $U_{correct}$ в виде синусного и косинусного рядов, получим

$$\begin{aligned} \vec{U}_{correct} = & \frac{1}{3} \left(\sum_{i=0}^{N-1} u_A[k] \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - \right. \\ & \left. -j \sum_{i=0}^N u_A[k] \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=0}^{N-1} u_B[k] \cos\left(\frac{2\pi\left(i + \frac{1}{3}N\right)}{N}\right) - \right. \\ & \left. -j \sum_{i=0}^N u_B[k] \sin\left(\frac{2\pi\left(i + \frac{1}{3}N\right)}{N}\right) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=0}^{N-1} u_C[k] \cos\left(\frac{2\pi\left(i + \frac{2}{3}N\right)}{N}\right) - \right. \\ & \left. -j \sum_{i=0}^N u_C[k] \sin\left(\frac{2\pi\left(i + \frac{2}{3}N\right)}{N}\right) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $u_A[k], u_B[k], u_C[k]$ — текущие оцифрованные значения напряжения соответственно фаз A, B, C ; k — порядковый номер текущего измерения в пределах одного периода напряжения питания; N — количество дискретных измерений за один период.

Заменив значения косинусов и синусов на константы $W_{Re}[i]$ и $W_{Im}[i]$ (поворотные коэффициенты), которые хранятся в таблицах памяти цифрового вычислительного устройства, формулу (4) приводим к виду

$$\begin{cases} X_{\alpha}[k] = \frac{1}{3} \left(u_A[k] W_{Im}[k] + u_B[k] W_{Im}\left[k + \frac{1}{3}N\right] + \right. \\ \left. + u_C[k] W_{Im}\left[k + \frac{2}{3}N\right] \right); \\ X_{\beta}[k] = \frac{1}{3} \left(u_A[k] W_{Re}[k] + u_B[k] W_{Re}\left[k + \frac{1}{3}N\right] + \right. \\ \left. + u_C[k] W_{Re}\left[k + \frac{2}{3}N\right] \right), \end{cases} \quad (5)$$

где $W_{Re}[k], W_{Im}[k]$ — текущие значения поворотного синусного и косинусного коэффициен-

тов; $X_\alpha[k]$, $X_\beta[k]$ — промежуточные значения для расчета обобщенного вектора напряжения.

В результате проекции обобщенного вектора напряжения таковы:

$$\begin{cases} u_{f\alpha}[k] = u_{f\alpha}[k-1] - X_\alpha[k-N] + X_\alpha[k]; \\ u_{f\beta}[k] = u_{f\beta}[k-1] - X_\beta[k-N] + X_\beta[k], \end{cases} \quad (6)$$

где $u_{f\alpha}[k]$, $u_{f\beta}[k]$ — значения проекций обобщенного вектора напряжения на оси α , β в дискретном виде; $X_\alpha[k-N]$, $X_\beta[k-N]$ — значения за период прошедший для расчета проекций обобщенного вектора напряжения.

На следующем этапе определяется активная составляющая мощности по формуле

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) dt.$$

Для получения обновленных данных на каждом шаге дискретизации значения вышеприведенного интеграла предлагается вычислять через «скользящее среднее», которое рассчитывается по рекуррентной формуле

$$p[k] = u_A[k] i_A[k] + u_B[k] i_B[k] + u_C[k] i_C[k],$$

где $p[k]$ — текущее оцифрованное значение мгновенной мощности; $i_A[k]$, $i_B[k]$, $i_C[k]$ — текущие оцифрованные значения токов фаз A , B , C .

$$P[k] = P[k-1] - \frac{p[k-N]}{N} + \frac{p[k]}{N},$$

где $P[k]$ — текущее значение активной мощности, $P[k-1]$ — значение активной мощности на прошлом шаге дискретизации; $P[k-N]$ — значение мгновенной мощности за прошлый период.

Далее значения тока, которые должен генерировать активный фильтр, вычисляются, как и в оригинальной $p-q$ теории [5]:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{f\alpha}^2 + u_{f\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{f\alpha} & -u_{f\beta} \\ u_{f\beta} & u_{f\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ — мгновенные значения проекций обобщенного вектора скорректированного тока на оси α , β .

$$\begin{bmatrix} i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{3}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{3}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix},$$

где i_{cA} , i_{cB} , i_{cC} — токи коррекции фаз A , B , C .

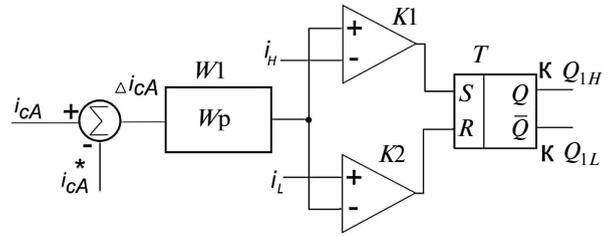


Рис. 1. Функциональная схема формирования сигналов управления ключами в фазе A

Для преобразования тока коррекции в сигнал, поступающий на ключи инвертора, удобно использовать алгоритм с гистерезисом (рис. 1).

Разность Δi_{cA} сигнала задания и фазного тока фильтра поступает на блок регулятора (блок $W1$), задача которого заключается в ограничении частоты f_Q работы силовых ключей (в данном примере $f_Q \leq 20$ кГц). Далее уровни сигналов i_H , i_L задают ширину токового коридора, формируемого компараторами $K1$, $K2$. Непосредственно импульсы для ключей Q_{1H} , Q_{1L} одного плеча инвертора генерирует RS -триггер.

По аппаратным затратам предложенный способ близок к оригинальной $p-q$ теории и требует приблизительно 29 умножений и 21 сложения за один шаг дискретизации системы управления фильтра ($p-q$ теория требует приблизительно 35 умножений и 21 сложение). Таким образом данный алгоритм может быть выполнен любым современным контроллером цифровой обработки сигнала.

Второй режим работы. В этом режиме задача определения тока коррекции фильтра сводится к вычислению амплитуды вектора тока и фазы вектора напряжения первой гармоники прямой последовательности. Токи коррекции фильтра вычисляются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - I_{f1} \cos(\varphi_{fU1} - \varphi_{fI1}) \times$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi_{fU1}) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{fU1}\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \varphi_{fU1}\right) \end{bmatrix},$$

где I_{f1} — амплитудное значение вектора тока первой гармоники прямой последовательности,

вычисленное по формулам, аналогичным (4)–(6); φ_{fU1} , φ_{fI1} — фазы векторов напряжения и тока первой гармоники прямой последовательности.

Формы сигналов и значения всех энергетических показателей в данном случае эквивалентны результатам, полученным при первом режиме работы (рис. 3). По аппаратным затратам данный метод можно считать более простым, чем предыдущий.

Ниже представлены результаты физического моделирования работы активного фильтра тока. Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

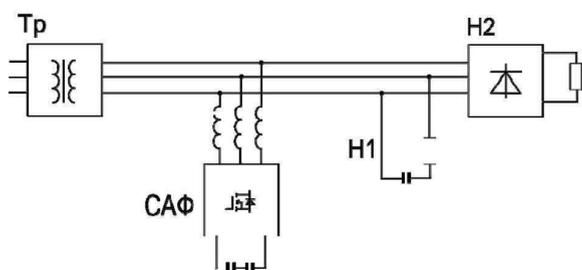


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки:

Tr — понижающий трансформатор 220/12 В; САФ — силовой активный фильтр; Н1 — активно-индуктивная нагрузка; Н2 — мостовой выпрямитель

Токи, протекающие в экспериментальной сети, отличны друг от друга по форме и действующему значению. Система напряжений сети искажена вследствие работы нелинейной на-

грузки. Параметры экспериментальной установки следующие:

| | |
|--|---------------------|
| Фазное напряжение сети | 12 В |
| Индуктивность САФ | 16 мГн |
| Емкость САФ | 1100 мкФ |
| Частота переключения ключей | |
| САФ | (10–15) кГц |
| Частота измерения АЦП САФ | 12,8 кГц |
| Параметры нагрузки Н1 | $Z = (48 - j29)$ Ом |
| Величина активного сопротивления нагрузки Н2 | $R = 66$ Ом |

Ниже представлены осциллограммы и оцифрованный сигнал системы управления устройства, которые позволяют оценить работу САФ.

В табл. 2 приведены некоторые показатели качества электрической сети экспериментальной установки.

Как видно из табл. 2, фазный ток и напряжение после коррекции приобретают синусоидальную форму. Системы токов и напряжений также являются симметричными друг относительно друга. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности после коррекции входит в допустимые пределы (согласно ГОСТ 13109). Коэффициент искажения фазных напряжений в данном опыте значительно ухудшается. Это можно объяснить тем, что АЦП оцифровывает «иголки» в кривой напряжения, вызванные переключением силовых ключей. Пассивный фильтр на выходе САФ в данной установке отсутствует.

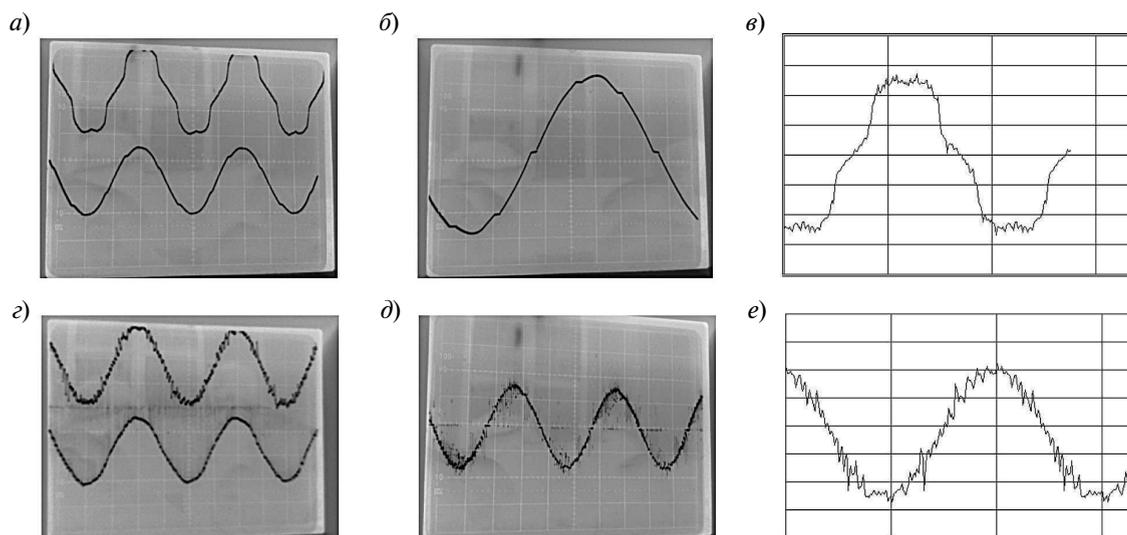


Рис. 3. Напряжение и ток одной фазы сети до коррекции (а), линейное напряжение до коррекции (б), оцифрованный ток фазы сети до коррекции (в) и соответствующие показатели после коррекции (г, д, е)

Таблица 2

Результаты физического моделирования работы активного фильтра

| Параметр | Фазы сети | До коррекции | После коррекции |
|--|-----------|--------------|-----------------|
| Угол сдвига фаз между кривыми напряжения и тока, эл. град. | А | 13 | 8 |
| | В | -22 | 10 |
| | С | 9 | 10 |
| Коэффициент искажения кривых фазного напряжения, % | А | 4 | 11 |
| | В | 2 | 15 |
| | С | 4 | 23 |
| Коэффициент искажения кривых фазного тока, % | А | 13 | 8 |
| | В | 14 | 7 |
| | С | 22 | 9 |
| Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, % | | 8,8 | 3,2 |
| Коэффициент несимметрии тока по обратной последовательности, % | | 32,7 | 3,4 |

Предложена концепция управления активными фильтрами, которая может обеспечить их работу с ориентацией на следующие критерии оптимальности:

1) равномерное потребление электрической энергии с симметрированием и балансировкой фазных токов в условиях несимметричной не-синусоидальной системы питания;

2) частичное устранение реактивной мощности (повышение коэффициента мощности).

Предложено два способа определения тока коррекции сети. Способы аналогичны с точки зрения продуктивности, однако второй способ более экономичен в плане аппаратных затрат.

Приведены примеры реализации некоторых математических выкладок в дискретном виде, пригодном для использования в цифровых микропроцессорных системах.

Предложенная концепция является синтезом частотных и временных методов выявления неактивных составляющих тока питающей сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters // Bulletin of the Polish Academy of science, Technical sciences. 2006. Vol. 54. P. 255–269.
2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits // IPEC'83— Int. Power Electronics Conf. 1983. P. 1375–1386.
3. Czarnecki L.S. On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power $p-q$ Theory // IEEE Trans. On Power Electronics. 2004. Vol. 19, No. 3. P. 828–836.
4. Czarnecki L.S. Effects of supply voltage asymmetry on IRP $p-q$ theory based switching compensator control // Accepted in IET Power Electronics. 2009.
5. Tolbert L.M., Halbeter T.G. Comparison of Time Based Nonactive Power Definitions for Active Filtering // Power Electronics Congress CIEP. October 2000. 2000. P. 73–79.
6. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
7. Тонкаль И.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. [и др.]. Баланс энергий в электрических цепях. Киев: Наукова Думка, 1992. 312 с.
8. Fryze S. Wring-, Blind-, and Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung // Elekt. Zeitschrift. 1932. Vol. 53, № 25. P. 596–599.
9. Depenbrock M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations // IEEE Transactions on Power Systems. 1993. Vol. 8. Iss. 2. P. 381–387.
10. Kale M., Ozdemir E. Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage // Electric Power Syst. 2005. Res. 77. P. 363–370.

REFERENCES

1. Akagi H. [Modern Active Filters and Traditional Passive Filters] *Bulletin of the Polish Academy of science, Technical sciences*. 2006. Vol. 54.— P. 255–269.
2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. [Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits]. *IPEC'83— Int. Power Electronics Conf.* 1983. P. 1375–1386.
3. Czarnecki L.S. [On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory]. *IEEE Trans. On Power Electronics* 2004. Vol. 19, No. 3. P. 828–836.
4. Czarnecki L.S. [Effects of supply voltage asymmetry on IRP p-q theory based switching compensator control] *Accepted in IET Power Electronics*. 2009.
5. Tolbert L.M., Halbetler T.G. [Comparision of Time Based Nonactive Power Definitions for Active Filtering]. *Power Electronics Congress CIEP*. October 2000. 2000. P. 73–79.
6. Usol'tsev A.A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami: uchebnoe posobie*. SPb.: Izd-vo SPbGU ITMO, 2006. 94 s. (rus.)
7. Tonkal' I.E., Novosel'tsev A.V., Denisiuk S.P. [i dr.]. *Balans energii v elektricheskikh tsepyakh*. Kiev: Naukova Dumka, 1992. 312 s. (rus.)
8. Fryze S. [Wrink-, Blind-, and Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung]. *Elekt. Zeitschrift*. 1932. Vol. 53, № 25. P. 596–599.
9. Depenbrock M. [The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations]. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1993. Vol. 8, Iss. 2. P. 381–387.
10. Kale M., Ozdemir E. [Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage]. *Electric Power Syst.* 2005. Res. 77. P. 363–370.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЗЛОВ Владислав Сергеевич — аспирант кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте Криворожского национального университета; 50027, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. XXII партсъезда, 11, Украина. e-mail: vskpost@yandex.ru

СИНОЛИЦЫЙ Анатолий Филиппович — доктор технических наук профессор кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте Криворожского национального университета; 50027, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. XXII партсъезда, 11, Украина.

КОЛЬСУН Вячеслав Анатольевич — кандидат технических наук доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте Криворожского национального университета; 50027, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. XXII партсъезда, 11, Украина. e-mail: kolsun_va@3g.ua

AUTHORS

KOZLOV Vladislav S. — SHEE «Kriviy Rih State University»; 50027, XXII parts'ezda street 11, Kriviy Rih, Dnipropetrovs'ka oblast, Ukraine. e-mail: vskpost@yandex.ru

SINOLITSYY Anatoliy F. — SHEE «Kriviy Rih State University»; 50027, XXII parts'ezda street 11, Kriviy Rih, Dnipropetrovs'ka oblast, Ukraine.

KOL'SUN Vyatsheslav A. — SHEE «Kriviy Rih State University»; 50027, XXII parts'ezda street 11, Kriviy Rih, Dnipropetrovs'ka oblast, Ukraine. e-mail: kolsun_va@3g.ua



УДК 536.6

*К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин,
В.Ю. Митяков, В.В. Османов*

РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

*К.А. Grigoryev, Yu.A. Roundyguine,
V.Yu. Mityakov, V.V. Osmanov*

DEVELOPMENT AND INDUSTRIAL TESTING OF A THERMAL MEASURING SYSTEM BASED ON GRADIENT HEAT FLUX SENSORS

Разработаны и апробированы зонды на основе градиентных датчиков теплового потока для измерения в камерах сгорания энергетических котлов. Предложена методика и выполнена градуировка зондов на физической модели газоплотного экрана топки, проведены ресурсные испытания зондов при многоцикловом термошоке. Разработаны способы монтажа зондов без нарушения герметичности водопарового тракта котла. Заложены методологические основы градиентной теплотметрии камер сгорания. Создана и успешно опробована система теплотметрии из зондов на паровом котле П-49 сверхкритического давления; приведены результаты промышленных испытаний.

ДАТЧИК ТЕПЛООВОГО ПОТОКА; КАМЕРА СГОРАНИЯ; ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОТЕЛ; ДИАГНОСТИКА ШЛАКОВАНИЯ; ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ.

Developed and tested probes based on the gradient heat flux sensors to measure the combustion chambers of power boilers. Developed a technique and carried out calibration of probes on a physical model of the furnace gas proof shield, held the endurance tests of the probes in multicyclic thermal stress. Developed methods of mounting the probes without disturbing the integrity of the boiler water-steam tract. Methodological foundations of the gradient heat flux measurement in combustion chambers are laid. Developed and successfully tested heat flux measuring system based on the probes in the boiler P-49 with supercritical pressure; there are results of industrial tests.

HEAT FLUX SENSOR; FURNACE; POWER BOILER; DIAGNOSIS OF SLAGGING; INDUSTRIAL TESTS.

Теплотметрия в высокотемпературных условиях камер сгорания — сложная, трудоемкая и дорогостоящая область исследований. Она важна при наладке энергетического оборудования и исследовании процессов (теплообменных, шлакования и др.), влияющих на плотность воспринятого теплового потока. Наибольший интерес вызывает локальное прямое измерение этого потока. Знание локальных значений тепловосприятия топочных экранов в камерах сгорания энергетических котлов необходимо для следующего:

диагностики шлакования, горения топлива, положения факела;

определения неравномерности тепловосприятия стен по ширине, глубине и высоте топки; оценки тепловой эффективности топочных экранов;

совершенствования существующих и разработки новых высокоэффективных технологий сжигания твердого топлива на основе уточненных значений тепловой эффективности топочных экранов.

Разработка недорогих и надежных средств измерения воспринятой плотности теплового потока — чрезвычайно важная и актуальная задача современной топочной теплотметрии.

Существующие методы теплотрии в топках котлов основаны на термометрии, что требует дальнейшего пересчета через характеристики термометрического средства измеренной термоЭДС в величину теплового потока. Наибольшее распространение получили переносные термозонды, температурные вставки, калориметры и др. [1].

Прямое измерение плотности теплового потока в топках котлов стало возможным благодаря созданию градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) на основе композитных термостойких материалов (например, никель + сталь 12Х18Н10Т), обладающих анизотропными тепло- и электропроводностью [2]. Работы в этом направлении ведутся с 2007 года на кафедре теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета С.З. Сапожниковым, В.Ю. Митяковым и А.В. Митяковым [3]. Принцип действия ГДТП основан на возникновении термоЭДС при прохождении через него теплового потока. Преимущество указанного композита связано с высокой термостойкостью и приемлемой для топочной теплотрии чувствительностью [4, 5]. Данная работа является продолжением комплекса исследовательских работ, начатых на кафедре теоретических основ теплотехники с участием кафедры реакторных и котельных установок применительно к топкам котлов [6, 7].

Первый опыт успешного внедрения ГДТП в промышленную эксплуатацию осуществлен в 2008 году на котле БКЗ-210 ст. № 9 ТЭЦ-4 г. Кирова [8, 9]. Результаты исследований показали принципиальную возможность применения этого типа датчиков в котельной технике и позволили наметить основные требования для создания методологических основ градиентной теплотрии.

Требования к конструктивной реализации градиентной теплотрии предполагают:

- создание измерительных зондов на основе ГДТП с учетом конструктивных особенностей и условий работы в камерах сгорания;
- разработку методики градуировки зондов в условиях близких к внутритопочным;
- разработку методики измерения локального тепловосприятия в топках котлов;
- разработку и создание теплотрической системы на основе зондов с ГДТП, которая име-

ет возможность регистрации, архивирования и анализа результатов измерений.

Измерительный зонд на основе ГДТП должен обеспечивать: приемлемую точность прямого измерения воспринятого теплового потока; высокую надежность в высокотемпературных топочных условиях при многократном использовании аппаратов водяной или паровой обдувки внутритопочных поверхностей; простоту монтажа; возможность быстрой замены без останова котла; минимум искажений теплового состояния топочного экрана; возможность обработки сигналов стандартными методами и приборами; устойчивость к электрическим помехам и наводкам, а также низкую стоимость как самого датчика, так и его градуировки. Для соответствия указанным требованиям ГДТП размещается в специальном корпусе и в совокупности с отводящими электродами образует собственно зонд (см. рис. 1, а).

Наиболее удачным представляется размещение зондов на резьбовом соединении в плавниках экранных труб газоплотных топочных панелей [10]. Это позволяет не нарушать герметичность контура циркуляции котла при монтаже и обслуживать зонды снаружи топки, используя имеющиеся площадки котла [11].

Выбор материалов для изготовления корпуса зонда производился с учетом материала экранной панели и его рабочей температуры, не превышающей 670 К. Корпус зонда (см. рис. 1, б) представляет собой цилиндр диаметром 10 мм из стали 12Х1МФ с резьбой для монтажа и торцевым углублением для ГДТП. Собственно ГДТП фиксируется в корпусе высокотемпературным (до 1800 К) теплопроводным электроизолирующим компаундом, который защищает датчик от механических и коррозионно-эрозионных повреждений. В корпусе выполнены два сквозных отверстия для вывода электродов от ГДТП. Электроизоляторами служат стеклянные микрокапилляры. При выводе электродов за пределы обмуровки котла они помещаются в высокотемпературный кембрик из стеклонити. Тепловой поток воспринимается торцевой поверхностью зонда, проходит через ГДТП и отводится через корпус зонда к плавникам экранных труб (рис. 2). Перед установкой зонда на резьбу наносится графитная смазка.

Разрабатывая систему теплотрии камер сгорания на базе использования зондов с ГДТП для условий сжигания различных видов твердых топлив учтен опыт сжигания сильношлакующих углей, который показал возможность заноса межтрубных плавников золо-шлаковыми отложениями в процессе работы котла. Поэтому предложено вынести торцевую лучевоспринимающую поверхность зонда в плоскость, проходящую через лобовые образующие экранных труб. Для этого со стороны топки на плавники приваривают сухари, в которые на резьбу устанавливают зонды (см. рис. 2). Таким образом, возможны два места монтажа зондов на газоплотных топочных панелях — плавник и сухарь.

Целью градуировки ГДТП без корпуса, как показано в [4, 6], является установление зависимости измеряемой термоЭДС от плотности теплового потока:

$$E_{ГДТП} = S_0 F_{ГДТП} q_{ГДТП}, \quad (1)$$

где $E_{ГДТП}$ — измеренная термоЭДС ГДТП, мкВ; S_0 — вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мкВ/Вт; $F_{ГДТП}$ — площадь ГДТП в плане, м²; $q_{ГДТП}$ — воспринятая датчиком плотность теплового потока, Вт/м².

Ручная сборка зондов влечет конструктивную и технологическую нетождественность, что требует градуировки зондов в рабочем тепловом состоянии и введения поправочных коэффициентов, учитывающих индивидуальные особенности монтажа и изготовления зонда. С этой целью разработана методика градуировки зондов в условиях близких к внутритопочным. В основу градуировки заложено установление зависимости измеренной термоЭДС зонда $E_{зонд}$, мкВ, от известной плотности воспринятого зондом теплового потока $q_{зонд}$, Вт/м²:

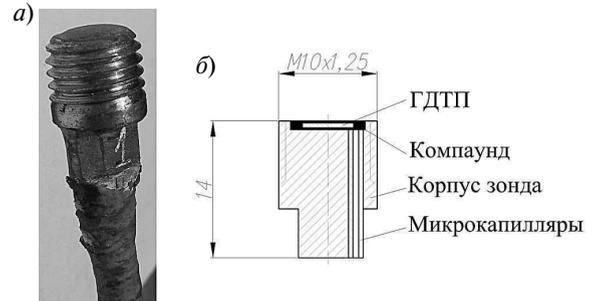


Рис. 1. Зонд на основе ГДТП:
а — внешний вид; б — устройство

$$E_{зонд} = a q_{зонд}, \quad (2)$$

где a , мкВ·м²/Вт — индивидуальный коэффициент зонда, учитывающий вольт-ваттную чувствительность ГДТП S_0 , площадь ГДТП $F_{ГДТП}$, термическое сопротивление слоя компаунда и резьбового соединения зонда, а также способ монтажа. Очевидно, что плотность теплового потока, воспринятая зондом на сухаре, отличается от тепловосприятия зонда на плавнике в силу различных условий облучения и термического сопротивления сварных швов сухаря и плавника. Именно поэтому градуировка сводится к определению индивидуальных коэффициентов, учитывающих расположение зондов на сухаре ($a_{сух}$) и на плавнике ($a_{пл}$):

$$a_{сух} = \frac{E_{зонд\ сух}}{q_{зонд}}; \quad (3)$$

$$a_{пл} = \frac{E_{зонд\ пл}}{q_{зонд}}, \quad (4)$$

где $E_{зонд\ сух}$ и $E_{зонд\ пл}$, мкВ — термоЭДС зонда при установке соответственно на сухаре и плавнике.

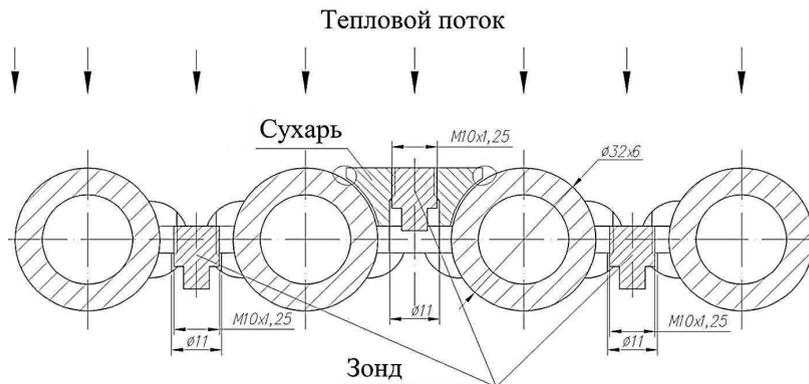


Рис. 2. Градуировочный стенд

Градуировка проводится на физической модели газоплотного топочного экрана. Источником теплоты служит факел при сжигании дизельного топлива. Условия градуировки приближены к внутритопочным, характер теплообмена имеет и радиационную, и конвективную составляющие. Изменение плотности падающего теплового потока осуществляется приближением и удалением факела от физической модели (далее — экрана). Экран изготовлен из труб $\varnothing 32 \times 6$ с шагом 48 мм, материал — сталь 12Х1МФ (см. рис. 2). Размер экрана в плане 176×270 мм. С огневой стороны экрана установлен сухарь и выполнены в плавниках для зондов два отверстия с резьбой.

Плотность воспринятого зондом теплового потока определяется балансовым методом по формуле

$$q_{\text{зонд}} = \frac{G_{\text{в}} c_p (T_{\text{в}}'' - T_{\text{в}}')}{F_{\text{экр}}}, \quad (5)$$

где $G_{\text{в}}$ — массовый расход охлаждающей воды, кг/с; c_p — средняя изобарная теплоемкость воды при температуре 290–373 К, Дж/(кг·К); $T_{\text{в}}'$, $T_{\text{в}}''$ — измеренные с помощью погружных термомпар температуры воды соответственно на входе и выходе из экрана, К; $F_{\text{экр}}$ — площадь огневой поверхности экрана, м². Такой способ определения плотности воспринятого теплового потока учитывает степень загрязнения огневой поверхности экрана и коэффициент теплопередачи от факела к воде, что сводит к минимуму неопределенность градуировки. Подставляя выражение (5) в (3) и (4), получаем зависимость для индивидуальных коэффициентов a в общем виде:

$$a = \frac{E_{\text{зонд}} F_{\text{экр}}}{G_{\text{в}} c_p (T_{\text{в}}'' - T_{\text{в}}')}. \quad (6)$$

Для оценки неопределенности градуировки и получения достоверных метрологических характеристик проведена серия опытов с четырехкратным повторением без демонтажа зондов. При этом влияние резьбового соединения не учитывалось. Неопределенность измерения индивидуальных коэффициентов одинакова и найдена согласно [1] на основе суммарной стандартной неопределенности с учетом выражения (6) при максимально достигнутой воспринятой плотности теплового потока 104 кВт/м²:

$$\Delta a = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} = 1,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{мкВ} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}. \quad (7)$$

Суммарная стандартная неопределенность величин, входящих в выражение (7), находится аналогично. В результате исследований установлено, что индивидуальные коэффициенты a партии зондов укладываются в диапазон 0,004–0,01 мкВ·м²/Вт. Поскольку каждый зонд имеет индивидуальный коэффициент $a_{\text{сух}}$ и $a_{\text{пл}}$, то и неопределенность измерения этих коэффициентов для каждого зонда будет отличаться. Учитывая этот факт, относительную неопределенность измерения индивидуальных коэффициентов нашли для зонда с минимальным значением a , равным 0,004 мкВ·м²/Вт, она не превысила

$$\delta a = \frac{\Delta a}{a} 100 \% = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-3}} 100 \% = 3,75 \%. \quad (8)$$

Методика градиентной теплотрии в реальных топочных условиях заключается в определении плотности теплового потока q , Вт/м², воспринятого экраном топки при прямом измерении термоЭДС зонда $E_{\text{зонд}}$, мкВ, в зависимости от способа установки зонда при его известных индивидуальных коэффициентах $a_{\text{сух}}$ и $a_{\text{пл}}$:

при установке зонда на плавнике

$$q = \frac{E_{\text{зонд пл}}}{a_{\text{пл}}}; \quad (9)$$

при установке зонда на сухаре

$$q = \frac{E_{\text{зонд сух}}}{a_{\text{сух}}}. \quad (10)$$

Очевидно, что измерение тепловосприятия топочного экрана зависит от теплопроводности резьбового соединения после монтажа зонда. С целью определения влияния резьбового соединения на показания зондов проведена серия опытов при многократных демонтаже и установке зондов на одно и то же резьбовое соединение.

Относительная неопределенность измерения воспринятого теплового потока зондами с ГДТП (с учетом влияния индивидуальных коэффициентов и резьбового соединения) не превысила 16 %.

Работу зондов в топочных условиях сопрягает регулярное применение аппаратов во-

дяной или паровой очистки топочных экранов, что может оказывать значительное влияние на ресурс зондов. Поэтому проведены ресурсные испытания зондов на водяной термошок, сопровождающийся многоцикловым нагревом-охлаждением. В испытаниях участвовали 6 зондов, в один из которых вмонтирована термопара для контроля температурного уровня зондов. Зонды нагревались газовым пламенем до температуры контрольного зонда 670 ± 20 К. После нагрева на торцевую рабочую поверхность зондов направлялась струя воды при температуре 300 К. Время контакта воды с зондом составляло 0,04 с, что соответствует времени контакта точек топочного экрана с движущейся водяной струей аппарата обдувки. При этом температура зондов в течение 4 с резко снижалась на 250 К. Затем зонды снова нагревались до 670 К, после чего повторялся водяной термошок. В испытаниях проведено 100 циклов нагрева-охлаждения. В итоге было установлено, что исследуемая конструкция и подобранные материалы зондов дают удовлетворительную надежность для топочных условий.

Промышленные испытания системы теплотри на базе ГДТП проведены на котле П-49 Назаровской ГРЭС в период пуско-наладочных работ. Котел П-49 (ст. № 7) — двухкорпусной (корпус А и Б) прямоточный сверхкритического давления с промежуточным перегревом пара — входит в блок 500 МВт. Характеристики котла: тепловая мощность — 740 МВт; давление и температура первичного пара — $p = 25,5$ МПа, $T = 818$ К; паропроизводительность каждого корпуса — 800 т/ч, топливо — назаровский бурый

уголь. Водопаровой тракт каждого корпуса выполнен по двухпоточной схеме (на корпусе А — нитки А и Б, на корпусе Б — нитки В и Г) симметрично относительно оси корпуса. Каждый корпус оснащен десятью мазутными растопочными горелками и двенадцатью пылеугольными (рис. 3). В 2013 году завершено техническое перевооружение этого блока с переводом обоих корпусов котла на низкотемпературную вихревую (НТВ) технологию сжигания. Зонды размещены на правой полутопке (на нитке А) нижней радиационной части (НРЧ) НТВ-топки корпуса А в один ярус на отметке 10,5 м на фронтальной, боковой и задней стенах, а также на боковой стене равномерно по высоте (см. рис. 3).

Места установки зондов выбраны по соображениям их размещения в зонах максимальных температур и возможного шлакования при сжигании твердых топлив в НТВ-топках. С учетом индивидуальной градуировки сигналы от зондов обрабатываются, регистрируются и архивируются в виде плотности теплового потока ($\text{кВт}/\text{м}^2$) с помощью двух модулей аналого-цифровых преобразователей ZET-220. Для защиты сигналов от электрических наводок применены экранированные провода, размещенные в отдельных металлических лотках с крышками. Монтаж зондов, коммутация проводов, настройка и наладка системы теплотри проведена совместно с ООО «Компания НТВ-энерго».

В период промышленных испытаний корпуса А котла П-49 осуществлялась растопка и стационарная работа на мазуте с последующей работой на угольной пыли. При этом на стационарной нагрузке при сжигании мазута

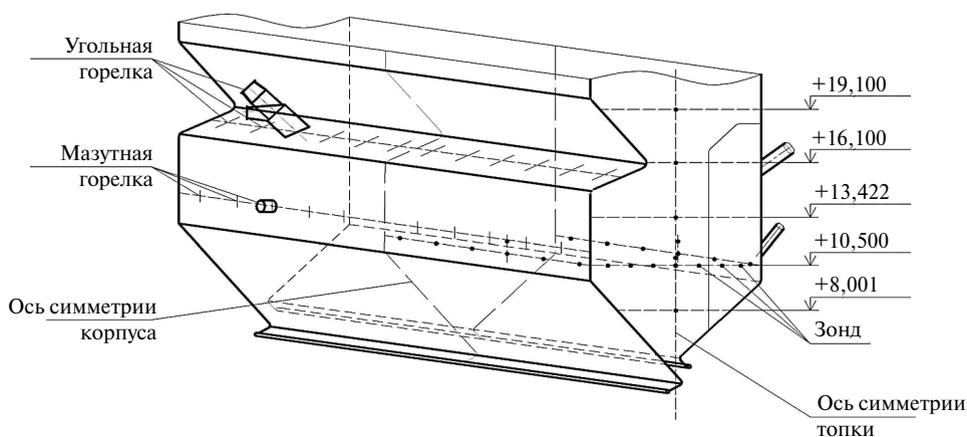


Рис. 3. Схема размещения зондов на стенах топки корпуса А котла П-49

паропроизводительность составляла 30 % от номинальной при работающих восьми мазутных горелках (крайние были отключены), а при сжигании угольной пыли — до 60 %.

На рис. 4 представлены характерные опытные данные по тепловосприятию зондов на фронтальной стене НРЧ по нитке А на отметке 10,5 м. Усреднение результатов измерений проводилось за каждые 20 минут.

Для количественной оценки работы зондов на графике (рис. 4, а) представлены показания отдельных зондов ($q_{\text{зонд } i}$, кВт/м²) и среднее между показаниями этих зондов ($q_{\text{зонд ср}}$, кВт/м²).

Для качественной оценки работы зондов на графике (рис. 4, б) представлена величина $q_{\text{зонд ср}}$, а также среднее тепловосприятие фронтального экрана НРЧ $q_{\text{фр}}$, кВт/м², на котором установлены зонды, тепловая мощность нитки А Q , МВт, с учетом топочных экранов и всей системы пер-

вичного пароперегревателя, тепловая мощность фронтальной стены НРЧ $Q_{\text{фр}}$, МВт, а также средняя температура продуктов сгорания на выходе из топки T''_T , °С.

Величина $q_{\text{фр}}$ рассчитана балансовым методом на основании показаний штатных приборов по формуле

$$q_{\text{фр}} = \frac{D(c_p|_{p'', T''} T'' - c_p|_{p', T'} T')}{F_{\text{фр}}}, \quad (11)$$

где D — массовый расход среды, кг/с; p' , T' и p'' , T'' — давление, МПа, и температура, К, среды соответственно во входном и выходном коллекторах фронтального экрана НРЧ; $c_p|_{p', T'}$, $c_p|_{p'', T''}$ — теплоемкости среды при соответствующих давлении и температуре, Дж/(кг·К); $F_{\text{фр}}$ — площадь фронтального экрана НРЧ, м².

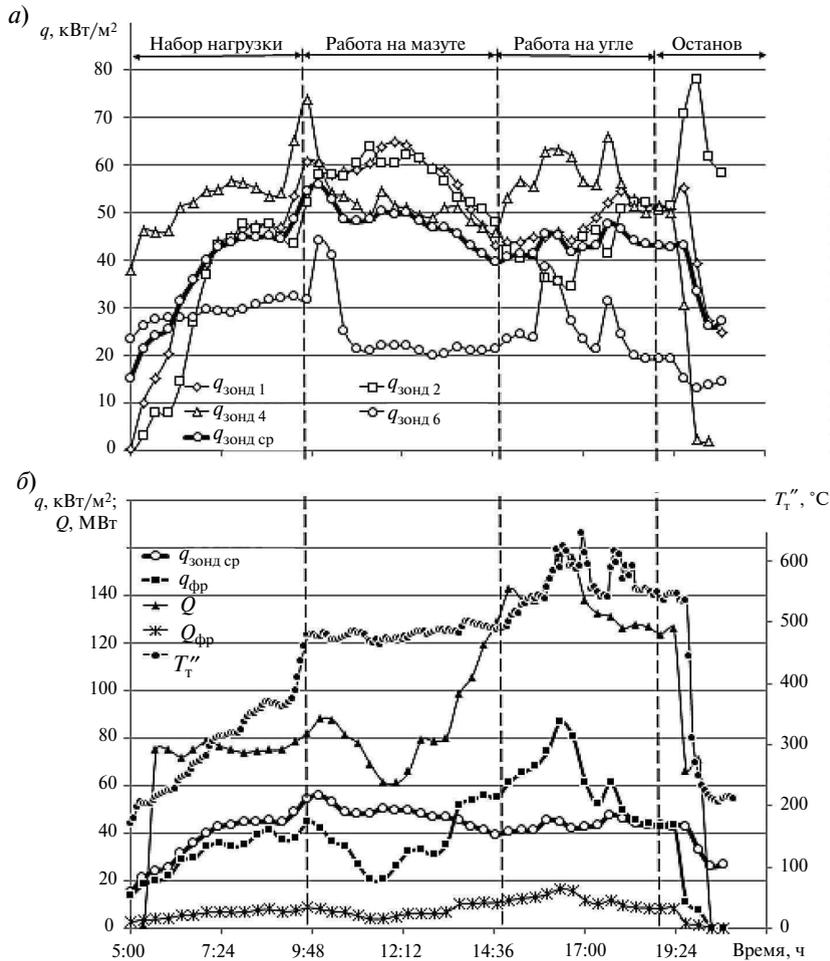


Рис. 4. Результаты промышленных испытаний:

а — показания зондов; б — сравнение показаний зондов с параметрами котла

На рис. 4 можно выделить период набора нагрузки (до времени 09:48), стационарный режим на мазуте (до 14:40), работа на угле (до 19:00) и аварийный останов по причине отключения электрогенератора при срабатывании защиты.

Показания зондов адекватно отражают тепловое состояние топки и изменяются в соответствии с режимными характеристиками котла. Так, в период набора нагрузки поочередно включались мазутные горелки, о чем свидетельствуют различные начальные уровни плотностей теплового потока соответствующих зондов (см. рис. 4, а), которые ко времени установившейся нагрузки на мазуте практически сблизились. Низкие значения зонда 6 обусловлены тем, что мазутная горелка у правой боковой стены топки была отключена.

В период стационарной работы на мазуте наблюдается неравномерность локального тепловосприятия отдельных зонд фронтального экрана (см. рис. 4, а) относительно среднего по зондам ($q_{\text{зонд ср}} = 49 \text{ кВт/м}^2$). Эти величины измеренных плотностей воспринятого теплового потока, а также соответствующие коэффициенты неравномерности тепловосприятия $\eta_{\text{T}} = q_{\text{зонд } i} / q_{\text{зонды ср}}$ на правой половине фронтальной стены НРЧ представлены на рис. 5. Полученная неравномерность имеет нарастающий характер к центру топки и укладывается в диапазон 0,43–1,28, что согласуется с известными данными, приведенными в [12], по тепловой разверке экранов камерных топков.

При работе на угле (см. рис. 4, а и б) наблюдаются два пика (в 15:40 и 17:20). Они обусловлены увеличением общего расхода топлива, который значительно различался между пылеугольными горелками. Так, все зонды (см. рис. 4, а) отреагировали на это увеличение, а зонды №4 и №6 наглядно демонстрируют неравномерность тепловыделения в топке. Анализ величин $q_{\text{зонд ср}}$ и $q_{\text{фр}}$ показывает, что переходные режимы работы котла сопровождаются резким различием указанных показателей. Это объясняется спецификой геометрии НТВ-топки и организации аэродинамики топочного процесса: доли лучистой и конвективной составляющих сложного теплообмена значительно изменяются по высоте фронтального экрана ввиду различия его облученности и омывания продуктами сгорания из-за фронтального аэро-



Рис. 5. Коэффициенты неравномерности и профиль плотностей воспринятого теплового потока

динамического выступа и активной вихревой аэродинамики в нижней части топки.

Анализ результатов промышленных испытаний показывает, что качественная картина изменения локального тепловосприятия, составленная по показаниям отдельных зондов $q_{\text{зонд } i}$ (рис. 4, а), согласуется с изменениями величин Q , $Q_{\text{фр}}$, а также T_{T}'' (рис. 4, б). Так, в период набора нагрузки наблюдается монотонный рост указанных параметров; при стационарной нагрузке на мазуте — показатели относительно стабильны; при работе на угле — два всплеска (величина $q_{\text{зонд ср}}$ изменялась примерно на 6 кВт/м^2); после останова — все показатели резко снижаются.

К еще одной возможности зондов можно отнести диагностику шлакования [13]. Снижение показаний зонда при длительной стационарной нагрузке будет свидетельствовать о локальном загрязнении экрана топки в месте установки зонда.

С июля по октябрь 2013 года наработка корпуса А котла П-49 составила более 700 ч, было осуществлено 26 пусков из холодного состояния, при этом все зонды сохранили работоспособность.

В результате промышленных исследований разработаны методологические основы топочной градиентной теплотметрии. В ходе ее конструктивной реализации успешно осуществлены такие этапы, как создание измерительных зондов на основе ГДТП применительно к камерам сгорания, разработка методики градуировки зондов в условиях, близких к внутритопочным,

и методики измерений локального тепловосприятия в топках котлов. Результаты промышленной апробации градиентной теплотметрии доказали ее принципиальную работоспособность, высокую надежность, достоверность ре-

зультатов и возможность ее применения в тяжелых высокотемпературных условиях топочных камер. Вместе с тем эта работа позволила наметить пути дальнейшего совершенствования конструкции зондов и методики измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Трембовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А.** Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с.

2. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.** Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 203 с.

3. **Митяков В.Ю., Можайский С.А., Сапожников С.З., Митяков А.В.** Градиентные датчики для высокотемпературной теплотметрии // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т. 34. Вып. 19. С. 1–5.

4. Митяков А.В. Градиентная теплотметрия в теплоэнергетических установках: дис.... д-ра тех. наук: 05.14.04 / Митяков Андрей Владимирович; СПбГПУ. Защищена 06.04.2010 г. СПб, 2010.

5. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.** Основы градиентной теплотметрии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 203 с.

6. **Османов В.В.** Градиентные датчики теплового потока для теплотметрии в топках котлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №4 Т. 1(183). С. 100–104.

7. **Сапожников С.З., Григорьев К.А., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Рундыгин Ю.А., Османов В.В.** Диагностика топочных процессов на основе градиентной теплотметрии // Проблемы и совершенствование угольной энергетики: Сб. докл. V научно-практ. конф. «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы» (Челябинск, 7–9 июня 2011 г.). Т. III.— Челябинск: Изд-во ОАО «ИЦЭУ», 2011. С. 249–258.

8. **Османов В.В., Григорьев К.А., Митяков А.В.** Градиентная теплотметрия в вихревой топке модерни-

зированного котла БКЗ-210 // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Матер. докл. VII школы-семинара молодых ученых и специалистов академika РАН В.Е. Алемасова (Казань, 15–17 сентября 2010 г.). Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2010. С. 277–280.

9. **Митяков В.Ю., Османов В.В.** Градиентная теплотметрия в радиационном и сложном теплообмене // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях: Тез. докл. XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. академика А.И. Леонтьева, Звенигород, 23–27 мая 2011.

10. **Пат. Российской Федерации на полезную модель 96654.** Датчик теплового потока / В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников, А.В. Митяков, К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин, В.Е. Скудицкий, В.В. Османов. № 2010115436/28. Заявлено 19.04.2010. Опубл. 10.08.2010. Бюл. № 22.

11. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Османов В.В.** Разработка градиентных датчиков теплового потока для теплотметрии в камерах сгорания. Горение твердого топлива: Тез. докл. VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13–16 ноября 2012 г. (CD).

12. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е. СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.

13. **Османов В.В., Глушков Д.О., Брикман И.А., Чернецкий М.Ю.** Экономическая оценка внедрения градиентных датчиков теплового потока для теплотметрии в камерах сгорания // Всероссийский журнал научных публикаций. 2013. № 5. Т. 15. С. 43–45.

REFERENCES

1. **Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeev A.A.** Thermal testing of boilers. M.: Energoatomizdat, 1991. 416 p. (rus.)

2. **Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V.** Gradient heat flux sensors in the heat engineering experiment. Saint-Petersburg: Publishing House of the Polytechnic university, 2007. 203 p. (rus.).

3. **Mityakov V.Yu., Mozhayskiy S.A., Sapozhnikov S.Z., Mitiakov A.V.** Gradient sensors for high temperature heat flux measurement. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2008. Vol. 34. Iss. 19. P. 1–5. (rus.).

4. **Mityakov A.V.** Gradient heat flux measurement in the thermal power plants: diss. ... Dr. Tech. Science: 05.14.04: protected 06.04.2010 / Mityakov Andrey Vladimirovich; SPbSTU. St. Petersburg, 2010. (rus.)

5. **Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V.** Basics of the gradient heat flux measurement. Saint-Petersburg: Publishing House of the Polytechnic university, 2012. 203 p. (rus.)

6. **Osmanov V.V.** Gradient heat flux gauges for measurement in industrial boiler furnaces. *Scientific and tech-*

nical sheets of SPb GPU. 2013. №4(183), Vol. 1. P. 100–104. (rus.)

7. **Sapozhnikov S.Z., Grigoryev K.A., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Roundyguine Yu.A., Osmanov V.V.** Diagnosis of combustion processes based on gradient heat flux measurement. *Problems and improvement of coal power: Proceedings of the V Scientific Conference «Mineral part of the fuel, slagging, cleaning boilers, capture and utilization of ash»* (Chelyabinsk, 7–9 June 2011). V. III.— Chelyabinsk OJSC «ICEU», 2011. P. 249–258. (rus.).

8. **Osmanov V.V., Grigoryev K.A., Mityakov A.V.** Gradient heat flux measurement in the vortex furnace of the upgraded boiler BKZ-210. *The problems of heat and mass transfer and hydrodynamics in power-plant engineering: Report s of VII school of young scientists and specialists of Academician V.E. Alesanov* (Kazan, 15–17 september 2010 г.).— Kazan: Publishing House of the Kazan university, 2010. P. 277–280. (rus.).

9. **Mityakov V.Yu., Osmanov V.V.** Gradient heat flux measurement in the radiative and complex heat transfer. *The problems of gas dynamics and heat and mass transfer in new energy technologies: s of XVIII Workshop for young*

scientists and specialists under the leadership of A. Leontiev, Zvenigorod, 23–27 may 2011. (rus.).

10. **Utility patent Russia 96654.** Heat flux sensor / V.Yu. Mityakov, S.Z. Sapozhnikov, A.V. Mityakov, K.A. Grigoryev, Yu.A. Roundyguine, V.E. Skuditskiy, V.V. Osmanov.— № 2010115436/28; Stated 19.04.2010; *Published 10.08.2010, Bulletin № 22.* (rus.).

11. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Grigoryev K.A., Roundyguine Yu.A., Osmanov V.V.** Development of the gradient heat flux sensors for the heat flux measurement in the combustion chambers. *Burning solid fuels: Proc. Reports. VIII All-Russia. Conf. with Intern. participation*, Novosibirsk, 13–16 November 2012 (CD). (rus.)

12. Thermal design of boilers (Normative method). Ed. 3rd.— St. Petersburg.: Publishing House of the NPO TsKTI, 1998. 256 p. (rus.)

13. **Osmanov V.V., Glushkov D.O., Brickman I.A., Chernetsky M.Yu.** Economic evaluation of the introduction of the gradient heat flux sensors for the heat flux measurement in the combustion chamber. *Russian Journal of scientific publications*. 2013. № 5(15). P. 43–45. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРИГОРЬЕВ Константин Анатольевич — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой реакторных и котельных установок института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kg1210@mail.ru

РУНДЫГИН Юрий Александрович — доктор технических наук профессор кафедры реакторных и котельных установок института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: rundygin@yandex.ru

МИТЯКОВ Владимир Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ теплотехники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: mitvlad@mail.ru

ОСМАНОВ Виктор Викторович — ассистент кафедры реакторных и котельных установок института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: osmanov_victor@mail.ru

AUTHORS

GRIGORYEV Konstantin A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kg1210@mail.ru

ROUNDYGUINE Yuriy A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: rundygin@yandex.ru

MITYAKOV Vladimir Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: mitvlad@mail.ru

OSMANOV Victor V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: osmanov_victor@mail.ru

УДК 621.165

А.В. Захаров, Г.Г. Шпензер, А.М.Тюхтяев

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОТОКА В ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЯХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

A.V. Zakharov, G.G. Shpenzer, A.M. Tyukhtyaev

FLOW STABILITY IN LPC LAST STAGES IN VARYING OPERATING MODES

В статье рассмотрены вопросы устойчивости течения потока в последних ступенях цилиндров низкого давления на номинальном и переменных режимах работы. Проанализированы различные режимы работы ступеней паровых турбин. Получены зависимости пульсаций потока, зон устойчивости потока и динамических напряжений от режима работы ступени. Определены критические режимы, характеризующие отрывные явления в рассмотренных ступенях.

ПАРОВАЯ ТУРБИНА; УСТОЙЧИВОСТЬ ПОТОКА; ПУЛЬСАЦИИ; КРИТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ; ОТРЫВ ПОТОКА.

In the article it has been examined an issue of flow stability of LPC last stages at design and varying operating modes. Different stages of steam turbines have been analyzed. Important dependences have been achieved, including flow fluctuation and stability zones, as well as dynamic stresses while changing the operational mode. Critical modes have been determined, which characterize flow separation for the examined stages.

STEAM TURBINE; FLOW STABILITY; FLOW FLUCTUATION; CRITICAL MODES; FLOW SEPARATION.

Создание высокоэффективных турбоэнергоблоков — приоритетная задача развития промышленной теплоэнергетики. Поскольку в мощных паровых турбинах, имеющих несколько цилиндров низкого давления (ЦНД), вырабатывается до 70 % мощности всего агрегата (турбины, работающие в области влажного пара), то ясна актуальность и важность повышения надежности и экономичности существующих цилиндров паровых турбин.

На современных тепловых и атомных электростанциях большая часть электроэнергии вырабатывается на номинальном расчетном режиме работы паротурбинной установки (ПТУ). И потому разработка проточных частей паровых турбин и решеток профилей лопаток проводится применительно к номинальному расчетному режиму работы ПТУ. При покрытии всего диапазона суточного графика потребления электроэнергии паровые турбины могут работать как на максимальном режиме работы, превышающем

номинальный расчетный, так и на режимах с расходом пара меньше номинального. Поэтому в процессе оптимизации работы турбины необходимо рассмотреть проектируемую ступень на всех режимах работы, включая режимы с максимальным и минимальным расходом пара. Поскольку профили рабочих лопаток соответствуют номинальному режиму, то при увеличенном объеме расходе пара (\overline{Gv}) возникают положительные углы атаки при обтекании профилей, провоцирующие срывные явления потока при наличии дополнительных стимуляторов отрыва. Особенно негативно изменение углов натекания потока сказывается в сверхзвуковом потоке при больших числах Маха (M_{W2}^* до 2 и более), так как в этом случае возникают скачки уплотнения, значительно снижающие КПД ступени.

Сложная структура высокоскоростного потока в последних ступенях мощных паровых турбин мало изучена, несмотря на существующие современные методы расчета потока. Это связано

с тем, что эти методы не позволяют в полной мере учитывать все факторы, влияющие на структуру потока, так как используются идеализация и вынужденные упрощения при моделировании парового потока. К ним относятся: наличие влажной фазы, срывные явления, вихревые течения, скачки уплотнения, турбулентность, шероховатость ступеней и т. д. Поэтому решение проблемы повышения экономичности и надежности работы последних ступеней ЦНД посредством совершенствования аэродинамики проточных частей необходимо проводить в совокупности с экспериментальными исследованиями. Настоящая работа направлена на получение эмпирических и полуэмпирических зависимостей, основанных на анализе экспериментальных данных, которые необходимы для конструктивных мероприятий по совершенствованию проточных частей турбин, а также для повышения точности существующих расчетов.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Неблагоприятные условия обтекания профилей в корневой и периферийной зонах лопаток связаны с появлением сильных пульсаций, которые отмечены в ряде экспериментальных исследований. Так, например, в исследованиях KWU [1] начиная от режима $\bar{N} = 0,4$ до режима \bar{N}_{\max} относительные динамические напряжения $\bar{\sigma}_d$ в рабочих лопатках последней ступени изменялись линейно, увеличиваясь приблизительно в 4 раза (рис. 1). В опытах ХТГЗ при

переходе от $\bar{Gv} = 0,6-0,7$ к $\bar{Gv} = 1,0-1,1$ пульсации полного напора в последнем рабочем колесе (РК) возрастали в 3–3,5 раза. В некоторых случаях в области больших \bar{Gv} наблюдался значительный рост пульсаций. Так, в опытах ХТГЗ с последними ступенями турбины К-300 (4-я и 5-я ступени) при $\bar{Gv} = 1,0-1,2$ пульсации полного напора достигали величины около 16–20%. Результаты проведенных исследований показаны на рис. 2.

Эти результаты опытов подтверждают, что в области $\bar{Gv} > \bar{Gv}_{\max}$ пульсации и соответствующие им динамические напряжения в лопатках имеют тенденцию существенно возрастать под влиянием обтекания профилей с положительными углами атаки. Если профили лопаток выбираются для расчетного режима, то уже при максимальном режиме положительные углы атаки в ступени большой верности могут возбуждать опасные пульсации. Поэтому, выбирая режим, необходимо иметь полную уверенность, что при $\bar{Gv}_{\max} = 1,0-1,2$ под влиянием всех возмущающих сил запас устойчивости в корневой зоне будет достаточным для надежной работы ступени.

Выбирая номинальный расчетный режим работы ступеней, необходимо считаться и с характером ветви КПД слева от расчетного режима [2, 3]. В этой области резкое падение КПД (η^*) связано с отрывными явлениями и пульсациями полного давления.

Накопленный большой опыт проектирования ЦНД мощных турбин дает возможность

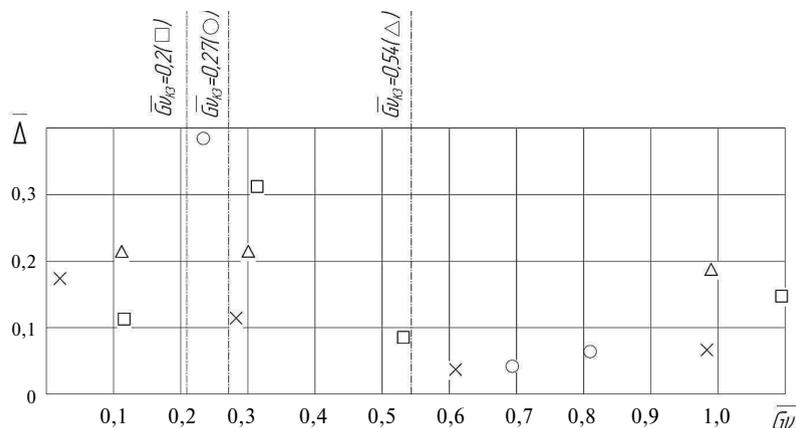


Рис. 1. Зависимость пульсаций полного напора от объемного расхода:
 □ — К-300, 5-я ступень (ХТГЗ); ○ — К-500 (ХТГЗ); △ — К-300, 5-я ступень (ХТГЗ);
 × — одиночная ступень ХПИ ($d/l = 2,58$)

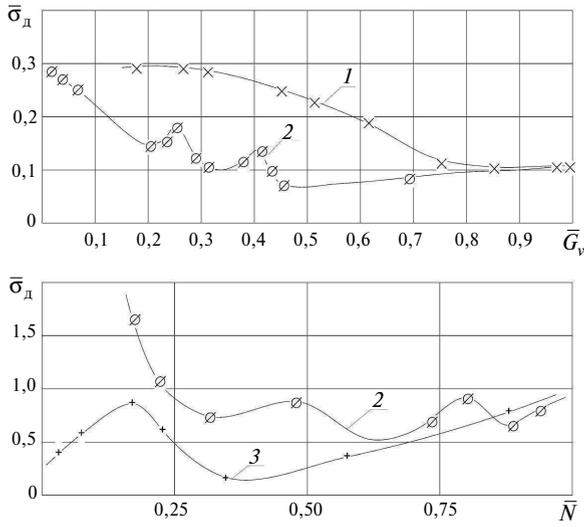


Рис. 2. Зависимость динамических напряжений в лопатках от нагрузки турбины:
1 — одиночная ступень ХПИ; 2 — ступень К-200В (Skoda, $d/l = 2,9$); 3 — ступень KWU $d/l = 2,83, l_2 = 1080$ мм)

достаточно точно установить два критических режима работы турбины: \overline{Gv}_{K2} (начало отрыва потока в корневой зоне ступени) и \overline{Gv}_{K3} (режим торможения) (рис. 3).

Третья критическая точка (\overline{Gv}_{K3}) достаточно точно определяется следующей эмпирической формулой В.Н.Пономарева [5]:

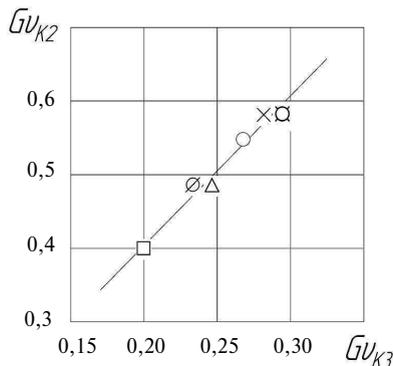


Рис. 3. Критические режимы работы последней ступени Gv_{K2} и Gv_{K3} для ряда высокоэффективных проточных частей турбин:

- — К-500 ХТГЗ; □ — К-300 4-я ступень ХТГЗ; Δ — ПТ-60-130 ЛМЗ;
- × — К-300-240 (13) ЛМЗ;
- — К-200 А Skoda; ∅ — К-200 В Skoda

$$\overline{Gv}_{K3} = \frac{\left(\frac{U}{C_0}\right)_p^2}{\left[\left(\frac{U}{C_0}\right)_p^2 + 0,5\left(\frac{v_{2p}}{v_{1p}}\right)\eta_{вп}\right]}, \quad (1)$$

где $\left(\frac{U}{C_0}\right)_p$, $\eta_{вп}$ — оптимальные значения этих величин на расчетном режиме; v_{1p} , v_{2p} — значения удельных объемов пара перед рабочим колесом и за ним на расчетном режиме.

Значения же \overline{Gv}_{K2} достаточно уверенно можно принять исходя из полученных экспериментальных данных для высокоэффективных проточных частей, состоящих из четырех-пяти ступеней:

$$\overline{Gv}_{K2} = (2 - 2,5)\overline{Gv}_{K3}. \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо для ступеней с положительной степенью реактивности ρ'_T . В зависимости от ряда факторов (например, в случаях обратной закрутки или наличия неоптимальной перекрыши у периферии рабочего колеса) соотношение (2) может существенно изменяться. Поскольку речь идет об исходной модели, нет необходимости на данном этапе уточнять положение второй критической точки. Обратим внимание, что режим торможения для хорошо спроектированной турбинной ступени находится в диапазоне

$$\overline{Gv}_{K3} = 0,2 - 0,25. \quad (3)$$

При рассмотрении использованы лишь те экспериментальные данные отсеков ступеней, которые имели положительную степень реактивности ρ'_T в последующей ступени. Отсеки же с отрицательной степенью реактивности ρ'_T имели вторую критическую точку (место начала отрыва потока — \overline{Gv}_{K2}), резко выпадающую из поля экспериментальных точек отсеков с $\rho'_T > 0$ (на рис. 3 не показаны). Рассмотренные ступени имели степень верности $d/l = 2,9 - 3,5$ и расчетный перепад энтальпий $H_0 = 195 - 235 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

В двухступенчатом отсеке начало отрыва \overline{Gv}_{K2} было меньшим, чем в многоступенчатой турбине, из-за наличия малого числа стимуляторов отрыва (например, в силу влияния числа ступеней в отсеке).

Заметим, что в расчетах оценка второй критической точки базируется на экспериментальных данных для наиболее совершенных моделей турбин. Третья же критическая точка достаточно точно определяется по (1), если известен КПД отсека η_B .

В заключение можно сделать вывод, что все три критические точки, характеризующие аэродинамику корневой зоны, связаны с выбором расчетного режима. Поэтому для повышения маневренных качеств ЦНД необходимо, чтобы начало отрыва (точка \overline{Gv}_{K2}) находилось на достаточном удалении от расчетного режима работы.

Для повышения маневренных качеств турбины очень важно обеспечить (без ограничения по времени) максимально возможную мощность при заданном давлении в конденсаторе, чему соответствует \overline{Gv}_{\max} . Этот расход пара может быть значительно больше, чем \overline{Gv}_p . Если на номинальном расчетном режиме были выбраны профили лопаток и углы потока, обеспечивающие максимальный КПД (η_p^*), то на режиме \overline{Gv}_{\max} поток будет обтекать эти профили при положительных углах атаки. Поэтому следует обращать внимание на пульсации потока в последней ступени большой веерности на режимах \overline{Gv}_{\max} . Эти пульсации возрастают с увеличением углов атаки, и их величина должна ограничиваться по соображениям прочности лопаток.

Выполненный анализ последних ступеней позволил установить, что в ступенях предельной веерности значительный сдвиг номинального расчетного режима от максимального не всегда

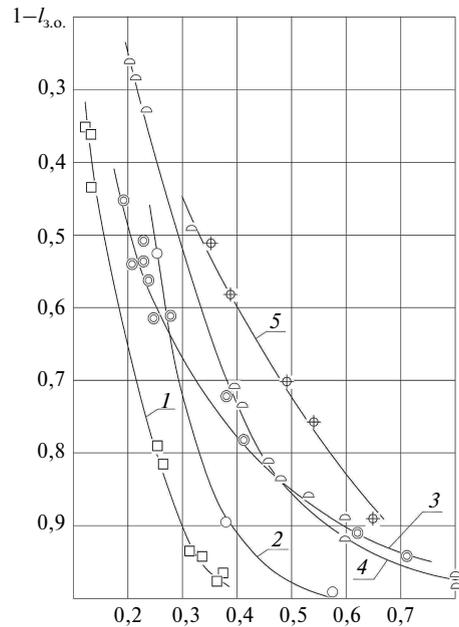


Рис. 4. Зона устойчивости потока для последних ступеней мощных паровых турбин:

1 — К-300 4-я ступень ХТГЗ; 2 — К-500 ХТГЗ; 3 — К-300–240 ЛМЗ; 4 — К-300 5-я ступень ХТГЗ; 5 — одиночная ступень ХПИ, $d/l = 2,28$ (испытания на воздухе); 5 — l — высота зоны отрыва

допустим, и существенный экономический эффект от этого сдвига может быть реализован лишь для ступеней с достаточно большим отношением d/l . При проектировании последнего рабочего колеса необходим поиск новых конструктивных решений в дополнение к известным способам, таким, как тангенциальный наклон направляющих лопаток и обратная закрутка потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлович Г.С., Трояновский Б.М. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. М.: Энергоиздат, 1982. 494с.: ил.
2. Захаров А.В., Шпензер Г.Г. Критические режимы работы последних ступеней мощных паровых турбин с лопатками предельной длины // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №1 (166). С. 41–44.
3. Захаров А.В., Шпензер Г.Г., Рассходин В.А. Устойчивость потока в рабочем колесе при различных условиях на входе в ступень // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №3 (178). С. 28–31.

4. Носовицкий А.И., Шпензер Г.Г. Газодинамика влажнопаровых турбинных ступеней. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
5. Пономарев В.Н. Исследование последних ступеней мощных паровых турбин в диапазоне режимов от номинальной нагрузки до холостого хода: автореферат дис. ... докт. техн. наук / В.Н. Пономарев. Харьков, 1977. 43 с.
6. Кириллов И.И., Шпензер Г.Г., Саркар С. Вынужденные колебания параметров потока в срывных зонах сопла Лавалья // Теплоэнергетика, 1983. №12. С. 60–62.

7. **Симкин М.С.** Повышение экономичности проточных частей низкого давления паровых турбин на базе разработки усовершенствованных методов расчета: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.С. Симкин. Л., 1978. 20 с.

8. **Кириллов И.И., Шпензер Г.Г., Варшавчик А.М.** Влияние резкогораскрытия меридиональных обводов проточной части цилиндра низкого давления паровых

турбин на эффективность турбинных ступеней. Известия вузов. Энергетика. 1988. №5. С. 61–65.

9. **Кириллов И.И.** Теория турбомашин. М.-Л.: Машиностроение, 1972. 536 с.

10. **Гаркуша А.В.** Исследование и разработка проточной части низкого давления мощных паровых турбин: автореф. дис...д-ра техн. наук/ А.В. Гаркуша. Харьков, 1980. 43 с.

REFERENCES

1. **Samoilovich G.S., Troyanovskiy V.M.** Peremennye i perekhodnye rezhimy v parovykh turbinakh— М.: Energoizdat, 1982. S. 494 s. (rus.)

2. **Zakharov, A.V. Shpenzer G.G., Rassokhin V.A.** Kriticheskie rezhimy raboty poslednikh stupeni moshchnykh parovykh turbin s lopatkami predel'noi dliny. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2013. (rus.)

3. **Zakharov A.V., Shpenzer G.G.** Ustoychivost potoka v rabochem kolese pri razlichnykh usloviyakh na vkhode v stupen. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPb-GPU*. 2013. №3 (178). S. 28–31. (rus.)

4. **Nosovitskii A.I., Shpenzer G.G.** Gazodinamika vlazhnoparovykh turbinnykh stupeni. L.: Mashinostroyeniye, 1977. 184 s. (rus.)

5. **Ponomarev N.V.** Issledovaniya poslednikh stupeni moshchnykh parovykh turbin v diapazone rezhimov ot nominalnoi nagruzki do kholostogo khoda: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk. Kharkov, 1977. 43 s. (rus.)

6. **Kirillov, I.I. Shpenzer G.G., Sarkar S.** Vynuzhden-

nyye kolebaniya parametrov potoka v sryvnykh zonakh sopla Lavalya. *Teploenergetika*, 1983. №12. S. 60–62. (rus.)

7. **Simkin M.S.** Povysheniye ekonomichnosti protochnykh chastey nizkogo davleniya parovykh turbin na baze razrabotki usovershenstvovannykh metodov rascheta: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk / M.S. Simkin. L., 1978. 20 s. (rus.)

8. **Kirillov I.I., Shpenzer G.G., Varshavchik A.M.** Izvestiya vuzov / Vliyanie rezkogo raskrytiya meridionalnykh obvodov protochnoy chasti tsilindra nizkogo davleniya parovykh turbin na effektivnost raboty turbinnykh stupeny. *Energetika*, 1988. №5. S. 61–65. (rus.)

9. **Kirillov I.I.** Teoriya turbomashin. М.-Л.: Mashinostroyeniye, 1972. 536 s. (rus.)

10. **Garkusha A.V.** Issledovaniye i razrabotka protochnoy chasti nizkogo davleniya moshchnykh parovykh turbin: avtoref. dis...d-ra tekhn. nauk/ A.V. Garkusha. Kharkov, 1980. 43 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАХАРОВ Александр Владимирович — аспирант кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; e-mail: vobla777@mail.ru

ШПЕНЗЕР Геннадий Григорьевич — кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, механический корпус, E-mail: shpenzer.g@gmail.com

ТЮХТЯЕВ Алексей Михайлович — аспирант кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; e-mail: Tyukhtyaev_AM@lmz.power-m.ru

AUTHORS

ZAKHAROV Aleksandr V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vobla777@mail.ru

SHPENZER Gennady G. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: shpenzer.g@gmail.com

TYUKHTYAEV Aleksey M. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: Tyukhtyaev_AM@lmz.power-m.ru

УДК 621.316.722.9

К.П. Тимошенко, А.А. Юрганов

КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН

К.Р. Timoshchenko, A.A. Urganov

MAIN FEATURES OF DESIGNING OF THE CONTROL SYSTEMS BY THE EXCITATION OF SYNCHRONOUS MACHINES

Во всех энергокомпаниях мира идет массовый перевод средств управления и регулирования с аналоговой на цифровую аппаратную базу. В процесс перехода возник ряд технических проблем. Приведен обзор основных проблем, выявленных в процессе многолетней разработки и эксплуатации систем управления возбуждением синхронных машин.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ; СИНХРОННАЯ МАШИНА; СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ; РЕГУЛЯТОР ПИД.

At present in all energy companies of the world there is a large scale transition of the managing and regulation facilities from the analog to the digital hardware. In the process of this transition a number of technical problems arise. The review is given of the principal problems identified in the process of the longstanding development and operation of the control systems by the excitation of synchronous machines.

CONTROL SYSTEM; SYNCHRONOUS MACHINE; EXCITATION SYSTEM; REGULATOR PID.

Актуальность проблемы

В настоящее время во всех энергокомпаниях мира идет массовый перевод средств управления и регулирования с аналоговой на цифровую аппаратную базу. Это относится и к системам автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронных машин (генераторы электростанций и мощные двигатели). Практически все производители оснащают их цифровыми системами возбуждения.

При этом структура АРВ и алгоритм автоматического регулятора возбуждения (АРВ) со-

храняются такими же, как в аналоговых системах (рис. 1).

По существующим правилам поставки оборудования производитель представляет компании-потребителю математическое описание своей продукции [8]. До настоящего времени такое математическое описание предоставляется в виде операторных передаточных функций (transfer Functions), состоящих из стандартных звеньев вида $W(s)$, где s — оператор Лапласа.

Практика показала, что часто работа математических моделей отличается от работы

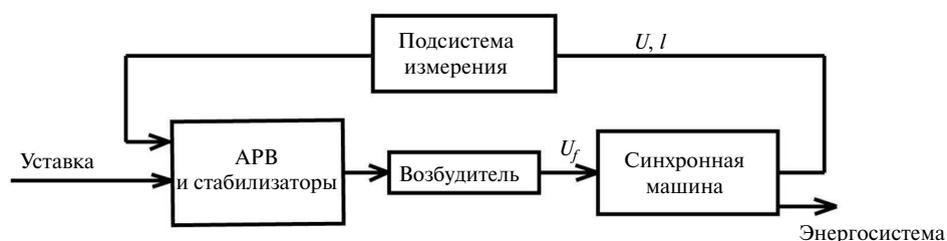


Рис. 1. Структурная схема системы управления возбуждением синхронной машины

реальных цифровых устройств [11], представленным таким образом. Поэтому в Российской Федерации разрешение на применение цифровых АРВ выдается только после испытаний головного образца на физической модели энергосистем в утвержденной типовой схеме и по единой утвержденной типовой программе [8]. Поиск возможных причин различия процессов в модели и в реальных устройствах САРВ привел к написанию данной статьи.

Цель данной работы — обобщение материала, накопленного в результате многолетнего опыта разработки систем регулирования и управления возбуждением синхронных машин. Статья — краткая выжимка основных проблем, возникающих при проектировании цифровых регуляторов возбуждения.

Анализ результатов испытаний и мер, принятых производителями для коррекции алгоритмов, позволил выявить основные причины различия свойств реальных дискретных устройств и их аналоговых моделей, принятых за основу при проектировании аппаратуры.

Требования, предъявляемые к первичной обработке и оцифровке входных аналоговых сигналов U, I и, как следствие, частоты f

Требования к обработке первичных сигналов вытекают из требований к частоте дискретизации, разрядности оцифровываемых данных и точности регулирования.

Перед преобразованием аналогового сигнала в цифровую форму необходимо обязательно осуществлять аналоговую фильтрацию с частотой среза, немного превышающей частоту дискретизации. Это требование связано с устранением алиасных частот в спектре полезного сигнала. Частота алиасного сигнала равна разности частот помехи и квантования. Происходит смещение спектра высокочастотного сигнала в низкочастотную область. На стадии цифровой обработки избавиться от такого вида помехи невозможно.

Чтобы предотвратить наложение спектров, сигнал, подаваемый на вход АЦП, должен быть пропущен через фильтр нижних частот для подавления спектральных компонент, частота которых превышает половину частоты дискретизации. Такой фильтр получил название anti-aliasing (антиалиасинговый).

Вообще, применение аналогового входного фильтра целесообразно не только по этой причине. Если в сигнале присутствуют компоненты значительно более мощные, чем полезный сигнал, и достаточно далеко отстоящие от него по частоте, то аналоговым фильтром нельзя подавить помеху достаточно эффективно. После оцифровки можно воспользоваться преимуществами цифровой обработки сигнала и построить эффективный цифровой фильтр. Такое решение позволяет сохранить динамический диапазон АЦП. Если помеха сильнее сигнала, на нее впустую будет тратиться в среднем три бита разрядности.

Характеристики системы, накладывающие ограничения на частоту дискретизации оцифровываемых данных:

быстродействие исполнительного элемента (для полного моста системы возбуждения — это $1/6$ периода синусоидального сигнала. То есть можно выдавать кванты воздействия не чаще, чем через $1/6$ период сигнала, подаваемого на тиристорный мост (рис. 2));

точность измерений, зависящая от формы сигнала. Если не применять специальные методы синхронизации реальной синусоиды и выбор точек измерений, для подсчета действующего значения сигнала с точностью $0,1\%$ требуется сделать 100 измерений на период. Частота выборки аналогово-цифрового преобразователя всегда не кратна частоте оцифровываемого гармонического сигнала, поскольку частота сигнала меняется во времени (при работе в сети — обычно не более $0,3$ Гц). Текущая ошибка измерения за период не будет превышать величину $\sim 0,1\%$, накопленную за один период квантования. Для исключения эффекта наложения спектров сигналов можно компенсировать ошибку, интерполировав остаток периода гармонического сигнала;

точность регулирования (влияет косвенно);
качество работы дифференциальных звеньев. Эти звенья накладывают жесткие требования к гладкости входного сигнала, поэтому при необходимости сигнал фильтруют, сглаживают.

Для повышения разрядности АЦП можно использовать передискретизацию.

Как правило, из соображений экономии вычислительной мощности сигналы оцифровываются с минимально необходимой частотой дискретизации, при этом шум квантования — «белый»,

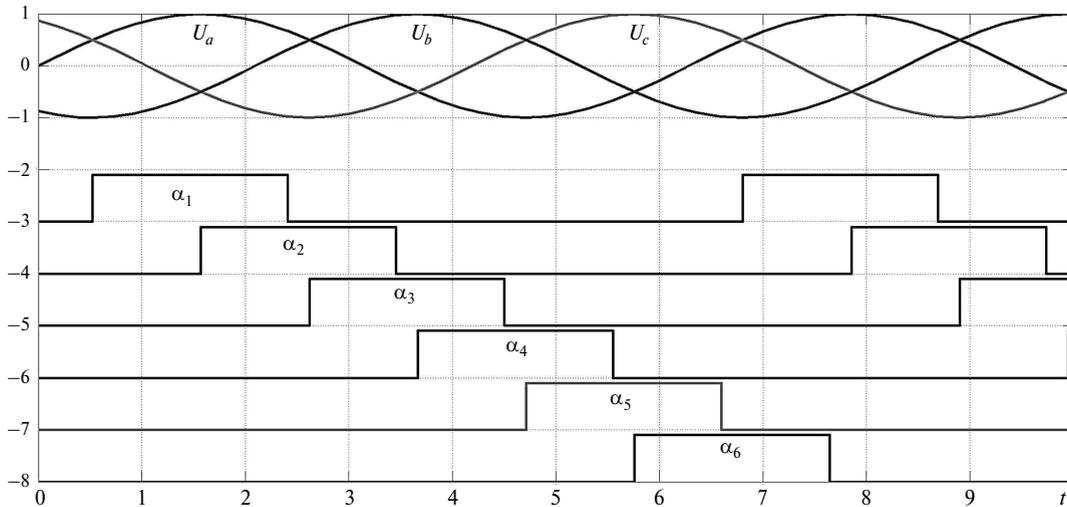


Рис. 2. Диаграмма трехфазного напряжения и углов зажигания тиристоров

т. е. его спектральная плотность мощности равномерно распределена во всей полосе. Если же оцифровать сигнал с гораздо большей частотой дискретизации, чем требуется по теореме Котельникова — Шеннона, а затем подвергнуть цифровой фильтрации для подавления спектра вне частотной полосы исходного сигнала, то отношение «сигнал/шум» будет лучше, чем при использовании всей полосы. Таким методом можно достичь эффективного разрешения большего, чем разрядность АЦП.

Передискретизация также может быть применена для смягчения требований к крутизне перехода от полосы пропускания к полосе подавления антиалиасного фильтра. Для этого сигнал оцифровывают, например, с вдвое большей частотой, затем производят цифровую фильтрацию, подавляя частотные компоненты вне полосы исходного сигнала, и, наконец, понижают частоту дискретизации путем децимации.

Характеристики системы, накладывающие ограничения на разрядность оцифровываемых данных:

точность измерений, или точность получения исходных значений для вычислений. Необходимо учитывать шум АЦП, который обычно составляет 1–2 разряда. Точность 0,1 % обеспечивается при 10 разрядах. С учетом двух «шумящих» разрядов без специальных мер подавления шума требуется 12 разрядов;

качество работы дифференциальных звеньев. Эти звенья накладывают жесткие требования к гладкости входного сигнала, поэтому

при необходимости сигнал фильтруют, сглаживают.

Требования, предъявляемые к измерителю частоты сигнала. Для системного стабилизатора внешнего движения в отечественных АРВ используется сигнал текущей частоты напряжения синхронной машины. Диапазон работы измерителя частоты составляет 20–100 Гц. Рабочий диапазон системного стабилизатора внешнего движения 0,01–5 Гц. Измерить 100 Гц с точностью 0,01 Гц возможно 14-тиразрядным счетчиком. Сделать аппаратный измеритель частоты с такой точностью — крайне затруднительно. Поэтому предпочтительно восстанавливать программно зону перехода сигнала через ноль и получать значение частоты как величину, обратную периоду напряжения на зажимах машины.

Преобразование передаточных функций в дискретную форму

Математические методы перехода от непрерывной передаточной функции к дискретной дают точные результаты. Здесь можно выделить две сложности. Обе они определяются особенностями программной реализации передаточных функций, заданных в операторной форме.

Первая особенность — это *разрядная сетка процессора*.

В процессорах с фиксированной запятой и длинной разрядной сетки 8, 16, 32 бит всегда необходимо следить за атомарностью операций и переполнением разрядной сетки. Последствия совершенно непредсказуемы. Атомарность опе-

раций в процессорах с разрядностью меньшей, чем разрядность, над которой производится операции, представляет собой огромную проблему.

Для процессоров с фиксированной запятой сложно производить Z -преобразование с необходимой точностью, поскольку в случаях, когда разность частот квантования и рабочих большая, коэффициенты передаточной функции оказываются близки друг к другу. И, соответственно, требуется бóльшая разрядность процессора.

Проблема решается применением математики с плавающей запятой. Но эмуляция плавающей запятой в процессоре с фиксированной запятой, как правило, затруднительна, поскольку на одну операцию эмуляции может уходить несколько десятков тактов. Попросту может не хватить производительности процессора.

В процессорах с плавающей запятой вышеуказанные проблемы отсутствуют.

Особенности реализации различных звеньев регулятора

В звеньях, содержащих интегрирующие цепи, присутствие эффекта «интегрального насыщения» требует особого внимания при реализации регуляторов в виде изделий. Выходное воздействие ограничено физической величиной — углом управления тиристоров (рис. 3 иллюстрирует результат этого эффекта).

График иллюстрирует поведение регулятора с интегральным звеном и при ограничении выходного воздействия.

Самым широко распространенным способом борьбы с этим эффектом можно признать метод условного запрета интегрирования. Суть его в том, что при достижении ограничения выходного воздействия накопление интеграла прекращается и он остается неизменным пока управляющее воздействие не выйдет из насыщения. При этом работают звенья, не содержащие интегрирующих элементов. Можно избежать этого эффекта, применив вместо выделенного интегрирующего звена звено с передаточной функцией

$$W = K \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2}.$$

Это звено также позволит ограничить сверхнизкочастотные колебания электрических сетей.

Звенья, содержащие дифференцирующие элементы. Цифровым дифференциатором называют линейную дискретную систему, обеспечивающую вычисление отсчетов производной сигнала по отсчетам самого сигнала в рабочей полосе. Идеальный цифровой дифференциатор имеет в рабочей полосе частот характеристику

$$H(e^{j\omega}) = jk\omega e^{-j\frac{\omega R}{2}} = k\omega e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\omega R}{2}\right)} = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

В дифференцирующем звене с ростом частоты входного сигнала растет амплитуда сигнала на выходе. Дифференцирующее звено усиливает высокочастотные помехи, особенно это заметно в случаях коммутационных перенапряжений и высокочастотных шумов первичных преобразователей.

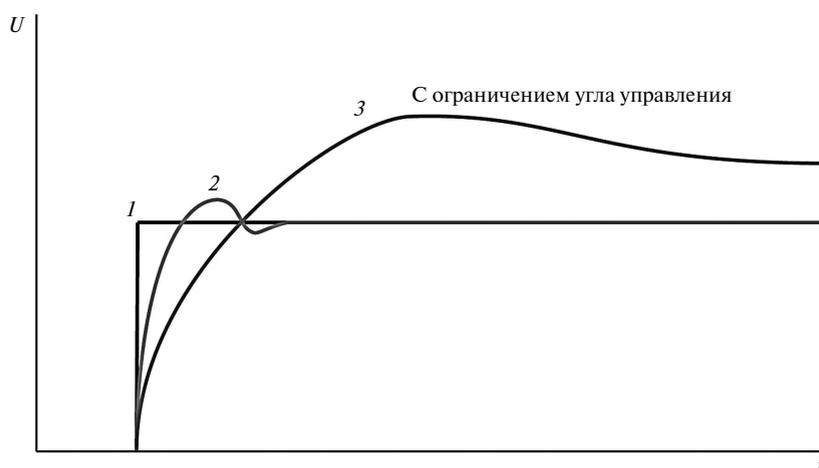


Рис. 3. График, иллюстрирующий перерегулирование при ограничении управляющего воздействия I (ступенчатое): реакции на входное воздействие без ограничения (2) и с ограничением (3) управляющей величины

Если полезный сигнал лежит ниже, чем сигнал помех, то мы можем смело отфильтровать высокочастотный сигнал. В системах возбуждения работа регулятора лежит в области сверхнизких частот (0,01–5 Гц) поэтому частоту выше 5 Гц можно отфильтровать. АЧХ регулятора имеет рабочий диапазон до 5 Гц.

Для более эффективного подавления высокочастотной помехи можно использовать фильтры более высокого порядка.

С помощью математического пакета FDA-Tools программы MathLab можно синтезировать цифровой дифференциатор на основе КИХ фильтра с заданными показателями качества.

Селектор каналов регулирования

В регуляторах возникают режимы, когда их параметры могут изменяться скачком (изменение параметров регулятора; смена переменной слежения, отключение — включение звеньев регулятора). Все эти манипуляции без дополнительных мер защиты приводят к нежелательным выбросам управляющего сигнала. Встает задача безударного перехода между режимами регулятора при изменении его параметров. Основную проблему вносят интегральные звенья.

В регуляторах применяют аппроксимацию: конечной суммой для интеграла и конечной разностью для производной. В первом случае умножают на коэффициент накопленное значение интеграла, а во втором накапливают разности, умноженные на постоянную времени. Для чистого интеграла обычно используют вычисление по формуле с правыми разностями:

$$I_{i+1} = I_i + \frac{\Delta t}{T_i} e_{i+1}.$$

Используем значение ошибки в момент вычисления интеграла.

Для предотвращения толчка при изменении времени интегрирования необходимо, чтобы в программной реализации регулятора постоянная времени входила под интеграл, а не перед ним. Отключение интегрального звена должно производиться прекращением его накопления, включение — продолжением работы с остановленного места. При изменении входной переменной необходимо менять закон регулирования. Нужно аккуратно выводить из работы и вводить обратно звенья регулятора.

Применение программно-аппаратных модулей для выявления переменных состояния объекта (отклонения частоты и ее первой производной по времени)

Существуют два основных метода преобразования передаточной функции линейной системы из непрерывной $W_{a(s)}$ в дискретную $W_{d(z)}$ функцию.

Первый метод сохраняет временные характеристики системы (инвариантность импульсных, переходных характеристик или реакций на более сложный входной сигнал). Этот метод гарантирует хорошее совпадение соответствующих временных характеристик для аналоговых и дискретных форм (примером могут служить экстраполяторы нулевого или первого порядка «ZOH», «FOH»).

Второй метод обеспечивает хорошее совпадение частотных характеристик, но не сохраняет точность временных (пример — билинейная аппроксимация Тастина и ее модификации).

С точки зрения обеспечения максимальной устойчивости и наилучшего качества регулирования целесообразно использовать метод инвариантности частотных характеристик. Здесь можно применять преобразование Эйлера и билинейное преобразование (Tustin's method transformation). С точки зрения сохранения частотных характеристик (особенно фазовых) метод билинейного преобразования предпочтителен [12].

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

частота дискретизации должна быть много больше, чем рабочая частота — это позволит избежать проблем при дальнейшей работе;

применение антиалиасного фильтра обязательно;

шум АЦП необходимо компенсировать; эффект интегрального насыщения является источником проблем при работе регуляторов;

сигнал перед дифференциатором необходимо сглаживать (например, с помощью фильтров высоких частот);

неправильное местоположение постоянных времени интегрирующих звеньев приводит к выбросам выхода регулятора при изменении величины самих постоянных времени;

селектор, управляющий вводом-выводом звеньев регулятора, требует особого внимания при программировании;

весьма желательно использовать микропроцессор той разрядности, в которой производятся математические вычисления;

при преобразовании передаточной функции линейной системы из непрерывной $W_{a(s)}$ в дискретную $W_{d(z)}$ функцию необходимо внимательно выбирать метод преобразования.

Учитывая сказанное, сформулируем требования к процессорной части регуляторов СВ:

в качестве процессора необходимо использовать процессор с плавающей запятой;

разрядность оцифровки входных значений должна быть не ниже 10 разрядов, т. е. разрядность АЦП — не ниже 12 bit;

необходима частота оцифровки не менее 20 кГц (оптимально — 40 кГц). Требование диктуется точностью вычисления параметров входного сигнала (при частоте 100 Гц — 100 точек на период);

требуется разрядность счетчика частоты не меньше 16 бит (желательно — 32 бит), что связано с точностью измерения частоты в диапазоне до 100 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович М.А. [и др.] Автоматика энергосистем. 3-е изд-е. -М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
2. Бессекерский В.А. [и др.] Микропроцессорные системы автоматического управления. Л.: Машиностроение, 1988. 365 с.
3. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами: справочник. Киев.: Техника, 1990. 280 с.
4. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66–74; 2007. № 1. С. 78–88.
5. Крутько П.Д. [и др.] Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем. М.: Радио и связь, 1988. 306 с.
6. Подчукаев В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы). М.: Физматлит, 2004. 392 с.
7. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2004. 400 с.
8. Стандарт ОАО «СО ЕЭС». Требования к систе-

мам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. (СТО 59012820.29.160.20.001–2012). Утвержден и введен в действие 03.04.12 // http://www.so-cdu.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_ES_AER_SA.pdf

9. Трохин В.М. Цифроаналоговые системы автоматического управления. Киев: Техника, 1979. 160 с.

10. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. // *The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 2006. 460 p.

11. Burmistrov A., Popov E., Urganov A., Gerasimov A., Esipovich A. Estimation of efficiency of modern excitation controllers of synchronous machines in the conditions of physical model of a complex power system and suggestion of estimation technique and criteriaas an addition to the IEC standard // *CIGRE*. 2012. C2–103

12. Way P. Digital Representations of Analog Systems for Control System Applications // http://m.eet.com/media/1060220/Digital_Representation_of_Analog_Systems.pdf

REFERENCES

1. Berkovich M.A. [i dr.]. Avtomatika energosistem. 3-ye izd-ye. M.: Energoatomizdat, 1991. 240 s. (rus.)
2. Bessekerskiy V.A. i dr. Mikroprotsessornyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya. L.: Mashinostroyeniye, 1988, 365 s. (rus.)
3. Gostev V.I. Sistemy upravleniya s tsifrovymi regulyatorami: spravochnik. K.: Tekhnika, 1990, 280 s. (rus.)
4. Denisenko V.V. PIDregulyatory: printsipy postroyeniya i modifikatsii. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii*. 2006. № 4. S. 66–74; 2007. № 1. S. 78–88. (rus.)
5. Krutko P.D. [i dr.]. Algoritmy i programmy proyektirovaniya avtomaticheskikh sistem. M.: Radio i svyaz, 1988, 306 s. (rus.)
6. Podchukayev V.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (analiticheskiye metody). — M.: Fizmatlit, 2004. — 392 s. (rus.)
7. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. — M.: Izdatelstvo MEI, 2004. — 400 s. (rus.)
8. Standart ОАО «SO EES». Trebovaniya k sistemam vzbuzhdeniya i avtomaticheskim regulyatoram vzbuzh-

deniya silnogo deystviya sinkhronnykh generatorov. http://www.so-cdu.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_ES_AER_SA.pdf (СТО 59012820.29.160.20.001–2012) utverzhdn i vveden v deystviye 03.04.12

9. Trokhin V.M. Tsifroanalogovyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya. K.: Tekhnika, 1979, 160 s. (rus.)

10. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. *The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 2006, 460 p.

11. Burmistrov A., Popov Ye., Urganov A., Gerasimov A., Esipovich A. Estimation of efficiency of modern excitation controllers of synchronous machines in the conditions of physical model of a complex power system and suggestion of estimation technique and criteriaas an addition to the IEC standard. *CIGRE*, 2012, C2–103.

12. Way Peter, Digital Representations of Analog Systems for Control System Applications. http://m.eet.com/media/1060220/Digital_Representation_of_Analog_Systems.pdf

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИМОЩЕНКО Константин Павлович — аспирант кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета «Горный»; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2; Россия; e-mail: konst.tim@gmail.com.

ЮРГАНОВ Алексей Анатольевич — доктор технических наук профессор кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета «Горный»; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2; Россия; e-mail: aarganov@gmail.com.

TIMOSHCHENKO Konstantin P. — National mineral resources university (University of mines); 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky ostrov, 21 liniya d.2; Russia; e-mail: konst.tim@gmail.com.

URGANOV Alexey A. — National mineral resources university (University of mines); 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky ostrov, 21 liniya d.2; Russia; e-mail: aarganov@gmail.com.

УДК 532.135

Б.Р. Абайдуллин

**ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В КОАКСИАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ В ФИКСИРОВАННЫХ ОБЛАСТЯХ
ПРИ ВОЗРАСТАНИИ ПАРАМЕТРА ФРАНК-КАМЕНЕЦКОГО**

B.R. Abaydullin

**CHANGES OF HEAT AND MASS TRANSFER CHARACTERISTICS
IN A COAXIAL REACTOR AT FIXED AREAS
WITH INCREASING FRANK-KAMENETSKY PARAMETER**

Приведена математическая модель теплообмена процесса полимеризации в реакторе коаксиального типа, позволяющая рассматривать распределения характеристик процесса при критическом режиме теплообмена в условиях течения неньютоновской жидкости. Результаты численного исследования представлены в виде распределений по длине и по радиусу канала температуры, осевой и радиальной компонент скорости, вязкости и концентраций мономера и инициатора при варьировании параметра Франк-Каменецкого. На границе канала задаются тепловые граничные условия первого рода.

НЕНЬЮТОНОВСКАЯ ЖИДКОСТЬ; ПАРАМЕТР ФРАНК-КАМЕНЕЦКОГО; КРИТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТЕПЛООБМЕНА; КОАКСИАЛЬНЫЙ РЕАКТОР; КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФфуЗИИ МОНОМЕРА И ИНИЦИАТОРА.

The paper contains a mathematical model of heat and mass transfer polymerization reactor coaxial type, which allows to consider the distribution of the characteristics of the process provided a critical mode of heat transfer in the flow of non-Newtonian fluids. The results of numerical studies presented in the form of distributions of temperature, axial and radial components of the velocity, viscosity and concentration of the monomer and the initiator of the length and radius of the channel by varying the parameter Frank Kamenetz. At the edge of the channel are set thermal boundary conditions of the first kind.

NON-NEWTONIAN FLUID; THE PARAMETER FRANK-KAMENETSKY; A CRITICAL MODE OF HEAT TRANSFER; COAXIAL REACTOR; THE DIFFUSION COEFFICIENTS OF THE MONOMER AND THE INITIATOR.

В работе [3] рассматривались установившееся течение и теплообмен неньютоновской жидкости в коаксиальном канале бесконечной длины со сформировавшимся профилем температуры. На практике чаще всего наблюдается изменение профиля температуры по длине. В связи с этим наибольший интерес представляет исследование влияния основных безразмерных параметров на условия возникновения критических режимов теплообмена в канале с учетом изменения температуры по длине и по радиусу. Численная реализация поставленных задач усложнена в силу того, что необходимо учитывать конвективный

теплоперенос, особенности изменяющегося неньютоновского характера поведения среды, убывание концентраций при условии химической реакции. Поэтому по данной тематике опубликовано небольшое количество работ. Исследование распределений температуры и компонент вектора скорости на начальном участке коаксиального канала в зависимости от интенсивности химического и диссипативного источников при условии преобладания одного из них уже рассмотрены в [4]. Проведены исследования этих характеристик и некоторых других основных определяющих параметров [5, 6].

Постановка задачи

Строя математическую модель стационарного теплообмена при течении неньютоновской жидкости в коаксиальном реакторе, как и в [4], приняли следующие допущения: течение — ламинарное, осесимметричное, стационарное; теплофизические характеристики жидкости, такие, как плотность, теплопроводность и теплоемкость, меняются в рассматриваемом диапазоне температур незначительно и приняты постоянными; силы тяжести входят в уравнения неявно через избыточное давление; перенос тепла вдоль основного направления движения за счет теплопроводности много меньше вынужденного в этом же направлении; время гидродинамической релаксации много меньше тепловой. Процесс будем считать квазистационарным, так как для рассматриваемых сред число Прандтля $Pr \gg 1$. Соответственно профиль вектора скорости почти мгновенно подстраивается под изменение температурного поля. Поэтому можно допустить, что изменение соответствующих составляющих вектора скорости в поперечных направлениях много больше их изменений в направлении основного движения (среда при этом предполагается несжимаемой каплевой жидкостью). Присутствует химический источник теплоты, распределенный по всему объему канала, заданный реакцией дробного порядка. На границе задаются гидродинамические условия прилипания, а также тепловые и концентрационные граничные условия первого рода.

При сделанных допущениях и некоторых преобразованиях решаемая система уравнений в цилиндрической системе координат будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(-P + 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right) + f_1 =$$

$$= \rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right);$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-P + 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + f_2 =$$

$$= \rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right);$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (v_r r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0;$$

$$v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} =$$

$$= a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\mu I_2}{\rho C_p} + \frac{Q_0 K_0}{C_M} e^{-\frac{E}{RT}} M^m J^n;$$

$$v_r \frac{\partial M}{\partial r} + v_z \frac{\partial M}{\partial z} =$$

$$= D_M \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) - K_0 e^{-\frac{E}{RT}} M^m J^n;$$

$$v_r \frac{\partial J}{\partial r} + v_z \frac{\partial J}{\partial z} = D_J \left(\frac{\partial^2 J}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial J}{\partial r} \right) - K_{i0} e^{-\frac{E_i}{RT}} J^n, \quad (1)$$

где $f_1 = -\frac{1}{r^3} (2\mu r v_r) + \frac{1}{r} \left(2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)$
и $f_2 = \frac{1}{r} \left(\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right)$.

В этих уравнениях $r_1 \leq r \leq r_2$, $0 \leq z \leq L$; Q_0 — тепловой эффект химической реакции; k_0 — константа скорости химической реакции; E — энергия активации химической реакции; a — коэффициент температуропроводности; $\mu = \mu(T, I_2)$ — динамическая вязкость; ρ — плотность жидкости; R — универсальная газовая постоянная; c_p — удельная изобарная теплоемкость; c_M — удельная молярная теплоемкость; T — температура; v_z, v_r — компоненты вектора скорости \vec{v} ; P — давление; r_1, r_2 — соответственно внутренний и внешний радиусы коаксиального канала; L — длина канала; K_{i0} — константа скорости реакции иницирования; E_i — энергия активации процесса иницирования; ρ — плотность жидкости; R — универсальная газовая постоянная, M — концентрация мономера; J — концентрация инициатора; D_M, D_J — коэффициенты взаимной диффузии мономера и инициатора. Второй инвариант тензора скоростей деформации I_2 представлен выражением

$$I_2 = \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 +$$

$$+ 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2. \quad (2)$$

Для системы уравнений (1) граничные условия задаются в следующем виде

$$\begin{aligned}
 &1) \quad v_z|_{r=r_1} = 0, \quad T|_{r=r_1} = T_0, \quad v_r|_{r=r_1} = 0, \quad M|_{r=r_1} = 0, \\
 &\quad \quad \quad J|_{r=r_1} = 0; \\
 &2) \quad v_z|_{r=r_2} = 0, \quad v_r|_{r=r_2} = 0, \quad T|_{r=r_2} = T_0, \quad M|_{r=r_2} = 0, \\
 &\quad \quad \quad J|_{r=r_2} = 0; \quad (3) \\
 &3) \quad M|_{z=0} = M_0, \quad J|_{z=0} = J_0, \quad T|_{z=0} = T^0, \\
 &\quad \quad \quad v_r|_{z=0} = 0, \quad v_z|_{z=0} = v_{z_0}(r), \quad \mu|_{z=0} = \mu^0.
 \end{aligned}$$

где T_0 — температура окружающей среды; T^0 — температура на входе в коаксиальный канал.

На входе в канал задается расход Q , и на входе в канал профиль компоненты v_z вектора скорости \vec{v} (то есть функция $v_{z_0}(r)$) является решением задачи

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (4)$$

при этом $T|_{z=0} = T^0$, а составляющая градиента давления $\frac{\partial P}{\partial z}$ в направлении оси z определяется из выражения

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{1}{Q} \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \mu(T, I_2) \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 r dr d\varphi, \quad (5)$$

где Q — расход жидкости через поперечное сечение канала. То есть получается, что поскольку на вход в реактор жидкость подается по коаксиальному каналу, то на входе в реактор профиль скорости такой же, как сформировавшийся профиль скорости в конце коаксиальной трубы. Для получения этого профиля $v_{z_0}(r)$ решается задача (4)–(5).

В качестве реологической модели используется модель Кутателадзе — Хабахпашевой [1] для структурно вязкой жидкости, подробно описанная в [4].

Для приведения системы уравнений (1) к безразмерному виду используются те же обозначения, что и в [2, 4].

Приведя вязкость, как и в [4], к безразмерному виду, получим

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{\tilde{\varphi}} = \frac{1}{\tilde{\varphi}_\infty - (\tilde{\varphi}_\infty - c_8 \tilde{\varphi}_0) \exp\left(-c_9 \tilde{\Theta} \frac{c_7 \tilde{\tau}}{\tilde{\varphi}_\infty - c_8 \tilde{\varphi}_0}\right)}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{\varphi}_\infty &= (c_1 - (1 - \tilde{M})) \exp\left(\frac{-c_2 + c_3(1 - \tilde{M})}{\beta(1 + \beta\theta)}\right); \\
 \tilde{\tau} &= \tilde{\mu} \sqrt{\tilde{I}_2}; \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{\varphi}_0 &= (c_4 - (1 - \tilde{M})) \exp\left(\frac{-c_5 + c_6(1 - \tilde{M})}{\beta(1 + \beta\theta)}\right); \\
 \tilde{\Theta} &= (1 - \tilde{M}) \exp\left(\frac{-c_5 + c_6(1 - \tilde{M})}{\beta(1 + \beta\theta)}\right). \quad (8)
 \end{aligned}$$

Подставляя (6) в (1) и переходя к безразмерным параметрам, как и в [4], получаем

$$\begin{aligned}
 &\frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left((\sigma + \tilde{r}) \tilde{\mu}(\tilde{I}_2, \theta) \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}} \right) = \\
 &= -(\sigma + \tilde{r}) \int_0^1 \tilde{\mu}(\tilde{I}_2, \theta) \left(\frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}} \right)^2 (\sigma + \tilde{r}) d\tilde{r}; \\
 &\frac{\partial}{\partial \tilde{r}} ((\sigma + \tilde{r}) \tilde{V}) + (\sigma + \tilde{r}) \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{z}} = 0; \\
 &(\sigma + \tilde{r}) \left(\gamma \tilde{V} \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}} + \gamma \tilde{W} \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{z}} \right) = \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left((\sigma + \tilde{r}) \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}} \right) + \\
 &+ \delta(\sigma + \tilde{r}) \tilde{M}^m \tilde{J}^n \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right) + \chi(\sigma + \tilde{r}) \tilde{\mu}(\tilde{I}_2, \theta) \tilde{I}_2; \\
 &(\sigma + \tilde{r}) \left(\gamma_M \tilde{V} \frac{\partial \tilde{M}}{\partial \tilde{r}} + \gamma_M \tilde{W} \frac{\partial \tilde{M}}{\partial \tilde{z}} \right) = \\
 &= \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left((\sigma + \tilde{r}) \frac{\partial \tilde{M}}{\partial \tilde{r}} \right) - \delta_M(\sigma + \tilde{r}) \tilde{M}^m \tilde{J}^n \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right); \\
 &(\sigma + \tilde{r}) \left(\gamma_J \tilde{V} \frac{\partial \tilde{J}}{\partial \tilde{r}} + \gamma_J \tilde{W} \frac{\partial \tilde{J}}{\partial \tilde{z}} \right) = \\
 &= \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left((\sigma + \tilde{r}) \frac{\partial \tilde{J}}{\partial \tilde{r}} \right) - \delta_J(\sigma + \tilde{r}) \tilde{J}^n \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta_J \theta}\right). \quad (9)
 \end{aligned}$$

После перехода к безразмерным параметрам граничные условия первого рода (3) примут следующий вид:

$$\begin{aligned}
 &1) \quad \tilde{W}|_{\tilde{r}=0} = 0, \quad \tilde{V}|_{\tilde{r}=0} = 0, \quad \theta|_{\tilde{r}=0} = 0, \quad \tilde{M}|_{\tilde{r}=0} = 0, \\
 &\quad \quad \quad \tilde{J}|_{\tilde{r}=0} = 0; \\
 &2) \quad \tilde{W}|_{\tilde{r}=1} = 0, \quad \tilde{V}|_{\tilde{r}=1} = 0, \quad \theta|_{\tilde{r}=1} = 0, \quad \tilde{M}|_{\tilde{r}=1} = 0, \\
 &\quad \quad \quad \tilde{J}|_{\tilde{r}=1} = 0; \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$3) \tilde{M}|_{\tilde{z}=0} = 1, \tilde{J}|_{\tilde{z}=0} = 1, \theta|_{\tilde{z}=0} = 0, \tilde{\mu}|_{\tilde{z}=0} = 1,$$

$$\tilde{V}|_{\tilde{z}=0} = 0, \tilde{W}|_{\tilde{z}=0} = \tilde{W}_0(r).$$

В формулах (6)–(10) присутствуют следующие параметры: $\tilde{z} = \frac{z}{L}$ — безразмерная продольная координата; $\tilde{r} = \frac{r-r_1}{r_2-r_1}$ — безразмерная поперечная координата; $\beta = \frac{RT_0}{E}$ — безразмерный параметр, число Аррениуса; $\theta = \frac{E}{RT_0}(T-T_0)$ — безразмерная температура; $\tilde{W} = \frac{2\pi(r_2-r_1)^2}{Q}v_z$ — безразмерная осевая компонента вектора скорости \bar{v} ; $\tilde{V} = \frac{2\pi L(r_2-r_1)}{Q}v_r$ — безразмерная радиальная компонента вектора скорости \bar{v} ; $\tilde{I}_2 = \frac{(2\pi)^2(r_2-r_1)^6}{Q^2}I_2$ — безразмерный второй инвариант тензоров скоростей деформации; $\xi = \frac{(r_2-r_1)^2}{L^2}$ — безразмерный параметр соотношения радиуса и длины коаксиального канала; $\sigma = \frac{r_1}{r_2-r_1}$ — безразмерный параметр, отвечающий за геометрию канала; $c_1 = \frac{A_\infty^{\eta=0}}{K_{A_\infty}}$, $c_2 = \frac{B_\infty^{\eta=0}}{E}$, $c_3 = \frac{K_{B_\infty}}{E}$, $c_4 = \frac{A_0^{\eta=0}}{K_{A_0}}$, $c_5 = \frac{B_0^{\eta=0}}{E}$, $c_6 = \frac{K_{B_0}}{E}$, $c_7 = \frac{Q}{2\pi K_{A_\infty}(r_2-r_1)^3}$, $c_8 = \frac{K_{A_0}}{K_{A_\infty}}$, $c_9 = \frac{K_\theta}{K_{A_\infty}}$ — реологические параметры; $\beta_J = \frac{E_J}{E}$ — число Аррениуса из уравнения для инициатора, $\tilde{J} = \frac{J}{J_0}$ — нормированная по длине концентрация инициатора; $\tilde{M} = \frac{M}{M_0}$ — нормированная по длине концентрация мономера; $\tilde{\mu} = \mu K_{A_\infty}$ — коэффициент динамической вязкости; $\delta = \frac{Q_0 K_0 (r_2-r_1)^2 E}{\lambda RT_0^2} M_0^m J_0^n \times \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right)$ — безразмерный параметр Франк-

Каменецкого, характеризующий интенсивность химического источника тепловыделения;

$$\delta_M = \frac{K_0 M_0^{m-1} J_0^n (r_2-r_1)^2}{D_M} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right),$$

$$\delta_J = \frac{K_{i0} J_0^{n-1} (r_2-r_1)^2}{D_J} \exp\left(-\frac{E_i}{RT_0}\right)$$

— безразмерные параметры Франк-Каменецкого, характеризующие интенсивность массовыделения в результате химической реакции;

$\chi = \frac{Q^2 E}{K_{A_\infty} 4\pi^2 \lambda RT_0^2 (r_2-r_1)^4}$ — безразмерный параметр, характеризующий интенсивность тепловыделения от вязкого течения; $\gamma = \frac{Q}{2\pi L a}$, $\gamma_M = \frac{Q}{2\pi L D_M}$,

$\gamma_J = \frac{Q}{2\pi L D_J}$ — безразмерные параметры, связывающие расход и длину канала; $\frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{z}} = \frac{2\pi(r_2-r_1)^4 A_0}{Q} \times$

$\times \exp\left(-\frac{B}{RT_0}\right) \frac{\partial P}{\partial z}$, $\frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{z}} = \int_0^1 \tilde{\mu} \left(\frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}}\right)^2 (\sigma + \tilde{r}) d\tilde{r}$ —

безразмерный перепад давления. Для решения системы уравнений (9) с граничными условиями (10) используется тот же итерационный алгоритм, что и в [4]. Он включает в себя решение соответствующих трехточечных разностных уравнений методом прогонки с пересчетом всех коэффициентов уравнений, зависящих от искомым функций. Вследствие нелинейности системы уравнений (9) и неявного вида функции вязкости были введены дополнительные итерации по вязкости и по нелинейному свободному члену.

Необходимая точность вычисления определяемых параметров задается величиной ϵ , с которой на каждом слое по координате \tilde{z} сравнивается относительное среднеквадратическое отклонение значений определяемых параметров на предыдущей и последующей итерациях.

Результаты

Для коаксиального реактора были рассмотрены зависимости характеристик, определяющих процесс, от параметра δ интенсивности химического источника в точке с фиксированными координатами $\tilde{r} = 0,06$, $\tilde{r} = 0,1$, $\tilde{r} = 0,5$ и $\tilde{z} = 0,5$. При этом остальные определяющие параметры, кроме δ , были зафиксированы и определены в [5].

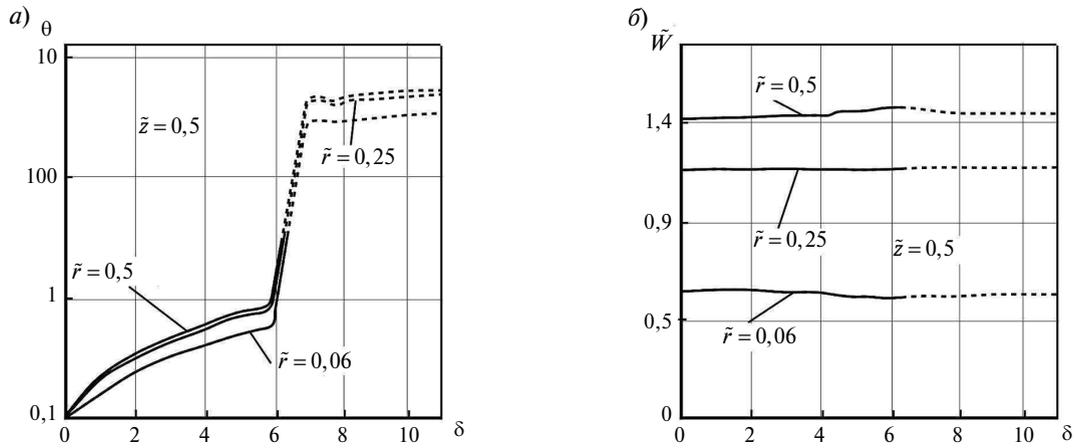


Рис. 1. Зависимости температуры θ (а) и скорости \tilde{W} (б) от параметра δ

Принцип исследования зависимостей характеристик, определяющих процесс, от управляющих параметров в реакторе аналогичен порядку исследования этих зависимостей на начальном тепловом участке в коаксиальном канале в [5].

На рис. 1 представлены графики изменения температуры в точках $\tilde{r} = 0,06$, $\tilde{r} = 0,1$, $\tilde{r} = 0,5$ и $\tilde{z} = 0,5$ при изменении параметра δ . Как следует из рис. 1, для рассматриваемой точки критическими являются значения параметра $\delta \geq 6$. При $\delta > 6$ в области начиная с точки $\tilde{z} = 0,5$ всегда существует критический режим.

Отметим, что в распределении температуры θ по \tilde{z} в [6] при $\delta = 6$ область с критическим режимом теплообмена начинается при $\tilde{z} \approx 0,8125$. Также из графиков температуры на рис 1, а и графиков ее распределений по длине при различных δ в [6] можно сделать вывод, что при уменьше-

нии δ область критического режима теплообмена смещается (по длине \tilde{z}) к концу реактора. Таким образом, каждому критическому значению δ соответствует свое (критическое) значение \tilde{z} .

При возрастании параметра δ ($\delta < \delta_{кр}$) компонента скорости \tilde{W} в центре межстеночной области (то есть при $\tilde{z} = 0,5$ и $\tilde{r} = 0,5$) увеличивается (как видно на рис. 1, б), а при $\tilde{r} = 0,1$ уменьшается. Зависимость $\tilde{V}(\delta)$ показана на рис. 2, а.

При условии постоянства расхода очевидно, что при увеличении скорости \tilde{W} в центре межстеночной области у стенок она уменьшается, и появляется \tilde{V} . Изменения \tilde{V} в зависимости от δ при $\delta < \delta^*$ (где $\delta^* = 6$ для $\tilde{z} = 0,5$) наиболее существенны.

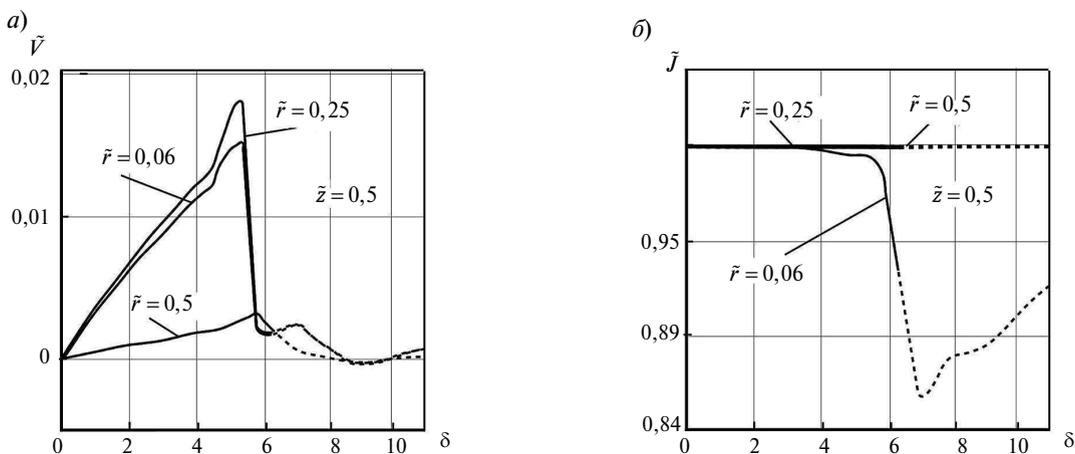


Рис. 2. Зависимости скорости \tilde{V} (а) и концентрации инициатора \tilde{J} (б) от параметра δ

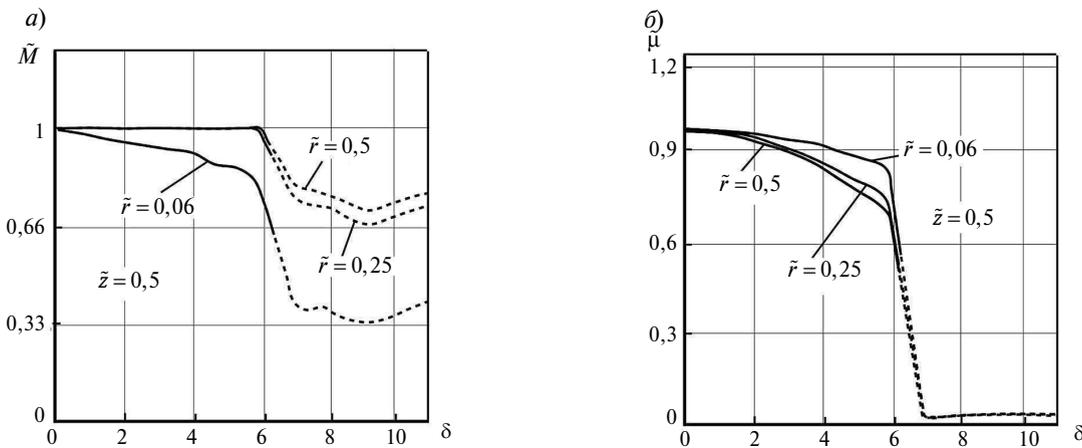


Рис. 3. Зависимости концентрации \tilde{M} (а) и вязкости $\tilde{\mu}$ (б) от параметра δ

На рис. 2, б и рис. 3, а представлены зависимости концентраций инициатора \tilde{J} и мономера \tilde{M} от параметра δ для этих же координат. Из них следует, что для данной координаты при возрастании параметра, отвечающего за интенсивность химического источника тепла, может произойти резкое падение концентрации \tilde{J} и \tilde{M} в области реактора, близкой к точке с координатами $\tilde{r} = 0,5$, $\tilde{z} = 0,5$. Что, конечно же, приводит к нежелательным последствиям. На рис. 3, б представлена зависимость вязкости $\tilde{\mu}$ от параметра δ .

Как видно из рисунка, вязкость с ростом δ уменьшается за счет большого роста температуры, поэтому при увеличении δ не происходит закупорки канала, как это бывает довольно часто на производстве

Предложена математическая модель течения обобщенной ньютоновской жидкости в реакторе коаксиального типа при совместном действии химического и диссипативного источников тепловыделения и проведен анализ результатов

численных исследований, полученных на основании этой модели.

В силу специфичности свойств неньютоновской жидкости в режимах, близких к критическим, было обнаружено изменение по длине профиля как продольной, так и поперечной компонент скорости жидкости. Как показали расчеты, в предкритическом режиме теплообмена поперечная скорость жидкости при $\tilde{r} = 0,5$ (то есть в центре межстеночной области коаксиального канала) близка к нулю.

Динамическая вязкость жидкости сильно зависит от температуры, однако в режимах, близких к критическим, также наблюдается влияние на нее и градиента скорости.

Наряду с аналогичными распределениями характеристик в [5] и [6], распределения характеристик θ , \tilde{W} , \tilde{V} , $\tilde{\mu}$, \tilde{J} , \tilde{M} по длине при различных значениях параметра δ дают ясную картину о процессах, происходящих в условиях критического режима теплообмена при течении неньютоновской жидкости в коаксиальном канале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе С.С., Хабахпашева Е.М., Попов В.И. К гидродинамике жидкостей с переменной вязкостью // ПМТФ. 1966. №1. С. 45–49.
2. Франк-Каменецкий Д.А. Теплопередача и диффузия в химической кинетике. 3-е изд. М.: Наука. 1987. С. 320–358.
3. Абайдуллин Б.Р. Влияние геометрии бесконечного коаксиального канала и реологических характеристик жидкости на критические значения темпера-

туры, скорости и вязкости // Труды Академэнерго. 2006. №3. С. 16–27.

4. Абайдуллин Б.Р., Назмеев Ю.Г. Расчет критических состояний течения обобщенной ньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала при диссипативном источнике тепловыделения // VII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию. Красноярск, 2006. С. 33–34.

5. **Абайдуллин Б.Р.** Исследование влияния основных определяющих параметров на критический теплообмен при течении неньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала // Труды Академэнерго. 2007. №1. С. 13–24.

6. **Абайдуллин Б.Р.** Зависимости характеристик теплообмена от параметра Франк-Каменецкого при критическом режиме теплообмена неньютоновской жидкости в реакторе // Труды Академэнерго. 2012. № 4. С. 20–28.

REFERENCES

1. **Kutateladze S.S., Khabakhpasheva E.M., Popov V.I.** К гидродинамике жидкости с переменной вязкостью. *PMTF*. 1966. №1. С. 45–49. (rus.)

2. **Frank-Kamenetskiy D.A.** Теплопередача и диффузия в химической кинетике. 3-е изд. М.: Наука, 1987. С. 320–358. (rus.)

3. **Abaydullin B.R.** Влияние геометрии бесконечного коаксиального канала и реологических характеристик жидкости на критические значения температуры, скорости и вязкости. *Trudy Akademenergo*. 2006. №3. С. 16–27. (rus.)

4. **Abaydullin B.R., Nazmeev Yu.G.** Расчет критических состояний течения обобщенной неньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального

канала при диссипативном источнике тепловыделения. *VII Vse-rossiiskaya konferentsiya molodykh uchenykh po matematicheskoy modelirovaniyu*. Krasnoyarsk, 2006. (rus.)

5. **Abaydullin B.R.** Исследование влияния основных параметров на критический теплообмен при течении неньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала. *Trudy Akademenergo*. 2007. №1. С. 13–24 (rus.)

6. **Abaydullin B.R.** Зависимости характеристик теплообмена от параметра Франк-Каменецкого при критическом режиме теплообмена неньютоновской жидкости в реакторе. *Trudy Akademenergo*. 2012. № 4. С. 20–28. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

АБАЙДУЛЛИН Булат Равилевич — младший научный сотрудник лаборатории ТФИ Исследовательского центра проблем энергетики науки Казанского научного центра Российской академии наук, г. Казань, 420056, ул. Компрессорщиков, д. 31; 8(843) 239-82-83.

AUTHOR

ABAYDULLIN Bulat R. — Research center for power engineering problems Federal government budgetary institution of science Kazan scientific center Russian Academy of Sciences; Kazan, 420056, Kompressorshikov str., 31; 8 (843) 239-82-83

УДК 621.983.044

*В.С. Мамутов, И.А. Шапошников***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА
ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ МАГНИТНО-ЭЛАСТОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ***V.S. Mamutov, I.A. Shaposhnikov***EXPERIMENTAL ESTIMATION OF EFFICACY
OF COIL SYSTEMS
FOR ELECTROMAGNETIC STAMPING BY POLYURETHANE**

Для процессов магнитно-эластоимпульсной штамповки (МЭИШ) разработана методика экспериментальной оценки давления магнитного поля плоского спирального индуктора в системе с подвижным элементом из хорошо проводящего материала. Методика построена на основе обработки измерений напряженности магнитного поля вдоль радиального направления спирали при помощи индукционного датчика и расчета коэффициента эффективности. Предложена система безразмерных параметров, влияющих на коэффициент эффективности. На основе обработки экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость коэффициента эффективности от безразмерных параметров. Данная зависимость может быть использована в практике расчетов технологического устройства и технологий МЭИШ.

МАГНИТНО-ЭЛАСТОИМПУЛЬСНАЯ ШТАМПОВКА; ПЛОСКИЙ СПИРАЛЬНЫЙ ИНДУКТОР; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ; НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ; ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК; БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ; ЭМПИРИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ.

The procedure of an experimental estimation of pressure of a magnetic field of a flat spiral inductor in system with a mobile element from good conduction is developed for processes electromagnetic stamping by polyurethane (EMSP). The procedure is based on measurement of magnetic density along a radial direction of a spiral by means of the induction sensor and effectiveness factor calculation. The system of the dimensionless parameters influencing effectiveness factor is offered. Empirical dependence of effectiveness factor on the dimensionless parameters is received. This dependence can be used in practice of calculations of the technological devices and technologies of EMSP.

ELECTROMAGNETIC STAMPING BY POLYURETHANE; FLAT SPIRAL INDUCTOR; EXPERIMENTAL ESTIMATION OF EFFECTIVENESS FACTOR; MAGNETIC DENSITY; INDUCTION SENSOR; DIMENSIONLESS PARAMETERS; EMPIRICAL DEPENDENCE.

В условиях мелкосерийного производства деталей из тонколистовых материалов экономически эффективны технологии штамповки, использующие один жесткий рабочий инструмент. Роль второго инструмента обычно выполняет эластичная среда, в качестве которой часто используют полиуретаны. К такой технологии от-

носится магнитно-эластоимпульсная штамповка (МЭИШ) [1–3].

Схема установки МЭИШ показана на рис. 1. При электрическом разряде конденсаторной батареи магнитно-импульсной установки (МИУ) на плоский спиральный индуктор I в зазоре между спиралью индуктора и подвижным

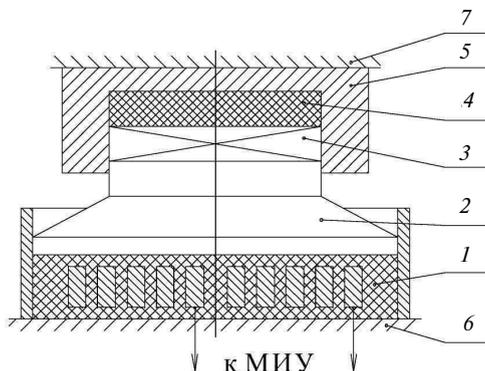


Рис. 1. Схема МЭИШ:

- 1 — плоский индуктор; 2 — подвижный элемент;
3 — объект нагружения; 4 — эластичная среда;
5 — контейнер; 6, 7 — механический прижим

элементом 2, выполненным из материала с высокой электропроводностью, возникает сильное импульсное магнитное поле. При перемещении подвижного элемента под действием электромагнитного усилия в замкнутом контейнере 5 с эластичной средой 4 возникает импульсное давление, которое воздействует на объект нагружения 3 (заготовка с инструментом).

Одна из наиболее важных задач при проектировании технологических устройств МЭИШ — повышение эффективности преобразования энергии [4]. В значительной степени это определяется эффективностью системы «индуктор — подвижный элемент». Преобразование импульсного давления самим подвижным элементом — механическим концентратором — можно оценить относительно просто [5]. В последнее время появилась возможность с помощью программного комплекса LS-DYNA 980 проводить расчет электромагнитных полей реальных индукторных систем, обеспечивающий определение электромагнитного давления [6]. Однако низкая сходимости вычислительного процесса требует для одного варианта расчета несколько десятков часов машинного времени, даже на суперкомпьютере. Поэтому цель нашей работы — экспериментальная оценка эффективности системы «индуктор — подвижный элемент». Экспериментальные данные нужны также для оценки корректности компьютерного моделирования.

Измерение напряженности магнитного поля индуктора

Электромагнитное давление может быть определено по величине напряженности маг-

нитного поля в конкретной точке зазора между спиралью индуктора и подвижным элементом, где помещается датчик. Для измерения напряженности магнитного поля могут применяться датчики, основанные, например, на эффектах Холла, Фарадея, Зеемана, изменения удельного сопротивления и др. [7]. Однако с точки зрения удовлетворения габаритных требований, простоты конструкции и применения, точности измерения в условиях МЭИШ наиболее целесообразно использовать индукционный датчик, представляющий собой катушку связи, в которой наводится напряжение, если поместить ее в изменяющийся во времени магнитный поток [7, 8].

Типичный индукционный датчик для измерения сильных импульсных магнитных полей в условиях МЭИШ [9] представляет собой катушку из 15–25 витков медной изолированной проволоки толщиной не более 0,05 мм, намотанных на каркас из лавсанового диэлектрика. Величина изоляционного зазора между индуктором и подвижным элементом до момента нагружения обычно не превышает 0,5–1,0 мм. Поэтому толщина датчика должна быть менее 0,5 мм. Размеры катушки вдоль силовых линий магнитного поля также должны быть достаточно малыми, чтобы усреднение вдоль этого направления не приводило к значительной погрешности измерения. Длина катушки задается в пределах 1–2 мм, а ширина — 5–10 мм. Для уменьшения паразитной индуктивности подводов провода перекручиваются и подсоединяются к коаксиальному кабелю, а для стабилизации параметров катушка и подводы пропитываются клеем.

Для индукторных систем, используемых для МЭИШ, характерно незначительное искривление силовых линий магнитного поля. Поэтому объемное электромагнитное усилие может быть заменено электромагнитным давлением [10]. При разряде конденсаторной батареи на спираль индуктора в зазоре между спиралью и подвижным элементом из электропроводного материала возникает импульсное магнитное поле с напряженностью H , наводящее вихревые токи в поверхностном слое материала подвижного элемента, что приводит к силовому воздействию на него. Для подвижного элемента, толщина которого значительно превышает скин-слой магнитного потока, просачивание поля практи-

чески отсутствует, и давление магнитного поля в этом случае определяется соотношением

$$p_m \cong \mu_0 H^2 / 2,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума.

Если вдоль силовых линий магнитного поля в изоляционный зазор между индуктором и подвижным элементом поместить катушку индукционного датчика с эффективной поверхностью S , то наведенное в ней напряжение будет пропорционально производной напряженности магнитного поля H по времени t :

$$V(t) = \mu_0 S (dH/dt).$$

Для получения на осциллографе сигнала, пропорционального напряженности магнитного поля на выход катушки перед осциллографом можно поставить RC -интегратор. Если постоянная времени интегрирования $\tau = RC$ намного превышает длительность сигнала, а входное сопротивление осциллографа намного больше сопротивления интегратора, тогда напряженность поля может быть определена по величине напряжения $U(t)$ сигнала на осциллографе следующей зависимостью:

$$H(t) = U(t)\tau / (\mu_0 S).$$

Эффективная поверхность S зависит от числа витков катушки датчика, площади витков и дополнительной паразитной площади подводов и контактов. Для практических измерений напряженности магнитного поля в условиях МЭИШ определяют некоторую интегральную характеристику чувствительности индукционного датчика [9]

$$k_H = \tau / (\mu_0 S).$$

Данный параметр можно определить, поместив катушку в однородное магнитное поле известной напряженности. В диапазоне 2–30 кГц частот разрядного тока такое поле с погрешностью неоднородности менее 1 % может быть создано внутри полоскового шунта из нихромовой фольги. Разрядный ток $I(t)$, измеренный при помощи пояса Роговского, и ширина шунта b_s определяют тарировочную напряженность магнитного поля

$$H_T = I(t) / b_s.$$

Сопоставление напряжения на осциллографе от индукционного датчика с этой величиной H_T позволяет определить величину k_H .

Для измерений использовался индукционный датчик с коэффициентом чувствительности $k_H = 1,06 \cdot 10^6$ (А/м)/В. Постоянная времени RC -интегратора была больше 1 мс, что обеспечивало погрешность интегрирования менее 5 %. Паспортная величина сопротивления входа осциллографа равнялась 1 МОм.

Схема измерений представлена на рис. 2. При разряде конденсаторной батареи C магнитно-импульсной установки 4 по спирали индуктора 1 протекает импульсный ток, а в изоляционном зазоре 2 между спиралью индуктора и подвижным элементом 3 возникает магнитное поле. Напряженность магнитного поля измеряется индукционным датчиком 6 с интегрирующей RC -цепочкой 7 . Измерение разрядного тока осуществлялось поясом Роговского 8 с интегрирующей RC -цепочкой 9 . Запуск развертки осциллографа 10 осуществлялся вспомогательным поясом Роговского 5 . В изоляционной прокладке 2 был выполнен паз для перемещения индукционного датчика 6 .

Пример осциллограммы разрядного тока и напряженности магнитного поля приведен на рис. 3, а. Распределение относительной напряженности магнитного поля (H/H_i) в зависимости от относительного радиуса (r/R_2) для момента максимума разрядного тока представлено на рис. 3, б. Здесь принято нормировочное значение напряженности, определяемое выражением напряженности поля идеального индуктора

$$H_i = I_m n / (R_1 - R_2),$$

где I_m — величина максимума тока; n — число витков индуктора; R_1, R_2 — внешний и внутренний радиусы спирали индуктора.

Измерения проводились для индуктора из медной шины шириной $b = 3$ мм, высотой $h = 14$ мм, с числом витков $n = 13$. Внешний и внутренний радиусы спирали: $R_2 = 65$ мм, $R_1 = 15$ мм. Толщина изоляционной прокладки была $\Delta \cong 1,75$ мм. С учетом изоляции спирали индуктора общий изоляционный зазор составлял примерно 2 мм. Подвижный элемент 3 был сделан из алюминия.

Экспериментальная оценка эффективности индуктора

Для идеального индуктора средняя величина электромагнитного давления на подвижный элемент равна

$$p_i = \mu_0 [In / (R_2 - R_1)]^2 / 2.$$

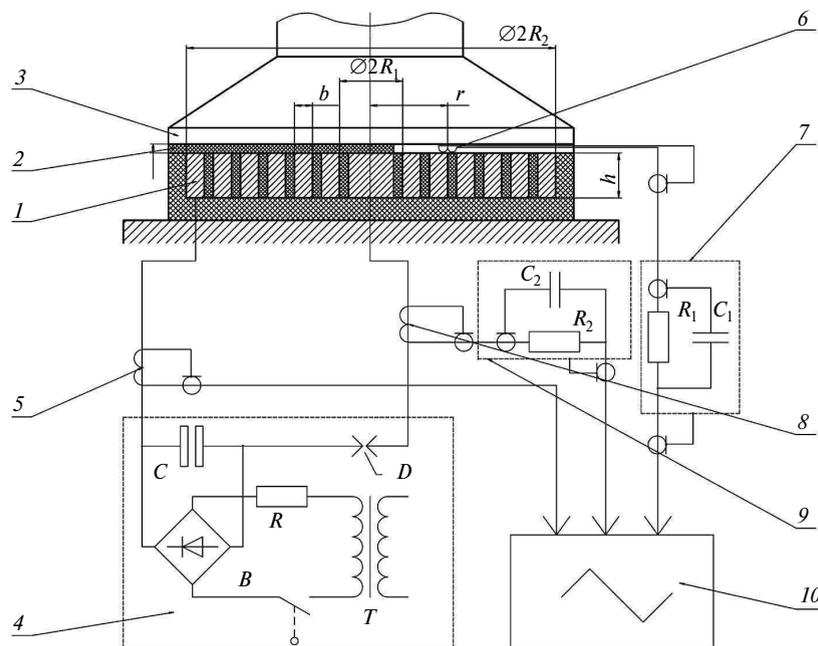


Рис. 2. Схема измерений напряженности магнитного поля:

1 — плоский спиральный индуктор; 2 — изоляционная прокладка; 3 — металлический подвижный элемент; 4 — магнитно-импульсная установка; 5 — пояс Роговского; запускаящий развертку осциллографа; 6 — индукционный датчик; 7 — интегрирующая цепочка; 8 — пояс Роговского для измерения разрядного тока; 9 — интегрирующая цепочка; 10 — осциллограф

Для расчета среднего электромагнитного давления реального индуктора целесообразно скорректировать данное выражение экспериментальной поправкой

$$P_M = P_i K_{IH},$$

где K_{IH} — некоторый поправочный коэффициент. Величина этого коэффициента может быть определена экспериментально на основе соотношения

$$K_{IH} = \bar{H}^2(I_m) / H_i^2(I_m),$$

где $\bar{H}^2(I_m)$ — среднее по площади спирали индуктора значение квадрата напряженности магнитного поля при максимальном значении тока I_m , протекающего через спираль; $H_i^2(I_m)$ — квадрат напряженности магнитного поля идеального индуктора. Параметр K_{IH} можно определять интегрированием квадрата экспериментальной

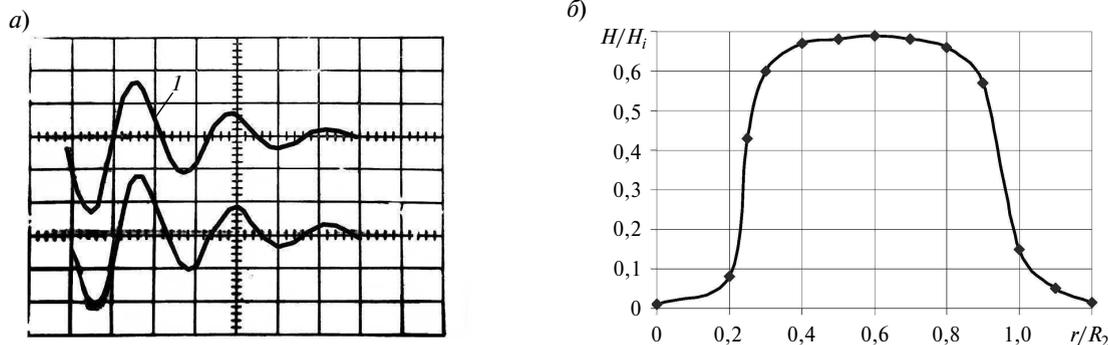


Рис. 3. Пример измерения напряженности магнитного поля для плоского спирального индуктора:

а) осциллограмма разрядного тока (1 — при масштабе по вертикали 4,1 кА/дел) и напряженности поля (2 — при масштабе по вертикали 0,53 МА/м/дел), масштаб по горизонтали — 20 мкс/дел; б) распределение относительной напряженности магнитного поля в радиальном направлении спирали индуктора

зависимости $K_{IH}(r) = \bar{H}^2(r, I_m) / H_i^2(I_m)$ в диапазоне $r \in [R_1, R_2]$. Данный параметр по величине меньше единицы и, по сути, определяет эффективность конкретной индукторной системы.

Измерения проводились на специальной опытной магнитно-импульсной установке, позволяющей устанавливать емкость конденсаторной батареи на уровнях $C = 50$ мкФ, $C = 100$ мкФ, $C = 200$ мкФ за счет частичного отключения последовательно и параллельно включенных отдельных конденсаторов. Изменение емкости батареи позволяло при прочих равных условиях варьировать частоту разрядного тока. Для получения зависимости параметра K_{IH} от геометрических параметров спирали индуктора в эксперименте были использованы три индуктора с числом витков спирали $n = 6$, $n = 9$ и $n = 13$. Спираль была выполнена из медной шины двух типоразмеров: $b = 3$ мм, $h = 14$ мм и $b = 4$ мм, $h = 8$ мм. Спирали имели внешний радиус $R_2 \cong 60$ мм и $R_2 \cong 70$ мм. Величина изоляционного зазора Δ варьировалась: были три фиксированных уровня — 1, 3 и 5 мм. Для подвижного элемента применялись следующие материалы с соответствующими значениями коэффициента магнитной диффузии: медь ($\chi_2 = 0,014$ м²/с), алюминиевый сплав ($\chi_2 = 0,021$ м²/с) и магний ($\chi_2 = 0,035$ м²/с).

Был проведен факторный эксперимент типа 2^4+1 , в котором на двух крайних уровнях варьировались емкость конденсаторной батареи, вид спирали индуктора, величина изоляционного зазора и марка материала подвижного элемента. Кроме того был выполнен эксперимент для центральной точки плана, определяющей некоторое среднее значение. При аппроксимации результатов эксперимента данные для центральной точки задавались с увеличенным в 4 раза весом коэффициентом по сравнению с результатами в других точках плана.

При обработке результатов эксперимента выбраны три комплексных безразмерных параметра, влияющих на параметр K_{IH} :

$$\lambda_1 = b\sqrt{f/\chi_1},$$

$$\lambda_2 = (\delta_1 + \delta_2) / (\delta_1 + \delta_2 + \Delta),$$

$$\lambda_3 = [1 - \Delta / (R_2 - R_1)] [1 - h / (R_2 - R_1)] nb / (R_2 - R_1).$$

где χ_1 — коэффициент магнитной диффузии материала шины; b — ширина шины спирали ин-

дуктора; δ_1 — скин-слой магнитного потока в материале индуктора; δ_2 — скин-слой магнитного потока в материале подвижного элемента при частоте f ; Δ — величина изоляционного зазора;

Величина скин-слоя магнитного потока с учетом нестационарности процесса диффузии магнитного поля определялась по формуле [7]

$$\delta = 0,78\sqrt{2\chi/\omega},$$

где ω — круговая частота разрядного тока, определяемая по величине первого периода.

С учетом диапазонов изменения размерных факторов безразмерные параметры варьировались в следующих диапазонах:

$$\lambda_1 \in [1,6; 3,7], \quad \lambda_2 \in [0,24; 0,78], \quad \lambda_3 \in [0,40; 0,71].$$

Обработкой экспериментальных данных получена зависимость параметра K_{IH} от безразмерных независимых параметров:

$$K_{IH} = 0,739\lambda_1^{0,249}\lambda_2^{0,791}\lambda_3^{0,118}.$$

Средняя погрешность аппроксимации опытных данных составила примерно 13 %. Данная зависимость может быть использована в практике расчетов технологического устройства и технологий МЭИШ. В компьютерной модели вместе с расчетом параметров разрядного тока данная зависимость позволит скорректировать давление магнитного поля идеального индуктора за счет «просачивания» поля в межвитковые зазоры и за счет движения подвижного элемента.

Разработана методика экспериментальной оценки давления магнитного поля плоского спирального индуктора в системе с подвижным элементом из хорошо проводящего материала. Экспериментальная методика построена на обработке измерений напряженности магнитного поля вдоль радиального направления спирали индукционным датчиком. Предложена система безразмерных параметров, определяющих напряженность магнитного поля. Данные параметры отражают геометрию спирали индуктора, величину изоляционного зазора между индуктором и подвижным элементом, частоту разрядного тока и характеристики диффузии магнитного поля в материалы спирали и подвижного элемента. На основе обработки экспериментальных

данных получена эмпирическая зависимость параметра, определяющего эффективность индукторной системы, от безразмерных параме-

тров, которая может быть использована в практике расчетов технологического устройства и технологий МЭИШ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богоявленский К.Н., Гиндин В.Б., Мамутов В.С. [и др.]**. Магнитно-импульсная штамповка с применением промежуточных эластичных сред. Л.: Изд-во ЛДНТП, 1982. 35 с.

2. **Богоявленский К.Н., Гиндин В.Б., Мамутов В.С. [и др.]**. Магнитно-эластоимпульсная вырубка-пробивка тонколистовых материалов // КШП. 1984. № 7. С. 12–14.

3. **Мамутов В.С.** Вырубка-пробивка особо тонколистовых металлов на магнитно-импульсной установке // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы международной науч.-практ. конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 867–874.

4. **Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С. [и др.]**. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубki-пробивки тонколистовых материалов // Металлообработка. 2001. №2. С. 28–32.

5. **Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С.** Пре-

образование импульсного давления механическим концентратором с учетом волновых процессов // Доклады национальной академии наук Беларуси. Технические науки. 2002. Т. 46. № 3. С. 115–119.

6. **L'Eplattenier P., Cook G., Ascraft C., Burger M., Imbert J. Worswick M.** Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulations. *Steel Research Int.* 2009. Vol 80, No. 5. P. 351–358.

7. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.

8. **Winkler K.** Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Berlin: VEB Verlag Technik, 1973. 456 s.

9. **Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С.** Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 207 с.

10. **Брон О.Б.** Электромагнитное давление // Межвуз. сб.: Механические взаимодействия в сильных магнитных полях. Л.: Изд-во СЗПИ, 1974. С. 7–13.

REFERENCES

1. **Bogoiavlenskiy K.N., Gindin V.B., Mamutov V.S., Oreshenkov A.I.** Magnitno-impul'snaya shtampovka s primeneniem promezhtuchochnykh elastichnykh sred. Leningrad: Izd-vo LDNTP, 1982. 35 s. (rus.)

2. **Bogoiavlenskiy K.N., Gindin V.B., Mamutov V.S., Oreshenkov A.I., Perezhogin A.N.** Magnitno-elastoimpul'snaya vyrubka-probivka tonkolistovykh materialov. *KShP*. 1984. № 7. S. 12–14. (rus.)

3. **Mamutov V.S.** Vyrubka-probivka osobo tonkolistovykh metallov na magnitno-impul'snoi ustanovke. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konferentsii*. St. Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. S. 867–874. (rus.)

4. **Zdor G.N., Mamutov A.V., Mamutov V.S., Smotrakov D.V.** Razrabotka effektivnykh tekhnologicheskikh ustroystv dlya magnitno-elastoimpul'snoy vyrubki-probivki tonkolistovykh materialov. *Metalloobrabotka*. 2001. № 2. S. 28–32. (rus.)

5. **Zdor G.N., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Preobra-

zovanie impul'snogo davleniia mekhanicheskim kontsen-tratorom s uchetom volnovykh protsessov. *Doklady natsional'noi akademii nauk Belarusi. Tekhnicheskije nauki*. 2002. Vol. 46, № 3. S. 115–119. (rus.)

6. **L'Eplattenier P., Cook G., Ascraft C., Burger M., Imbert J. Worswick M.** Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulations. *Steel Research Int.* 2009. Vol 80. No. 5. P. 351–358.

7. **Knopfel' G.** Sverkhstil'nye impul'snye magnitnye polya. Moscow: Mir, 1972. 392 s. (rus.)

8. **Winkler K.** Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Berlin: VEB Verlag Technik, 1973. 456 s.

9. **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.** Metody issledovaniya vysokoskorostnogo deformirovaniya metallov. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 207 s. (rus.)

10. **Bron O.B.** Elektromagnitnoe davlenie. *Mezhvuzovskiy sb.: Mekhanicheskie vzaimodeistviya v sil'nykh magnitnykh polyakh*, Leningrad: Izd-vo SZPI, 1974. S. 7–13. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович — доктор технических наук профессор кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vmamutov@mail.ru

ШАПОШНИКОВ Игорь Аркадьевич — кандидат технических наук доцент кафедры математики и естественных дисциплин института международных образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: shap.igor@mail.ru

AUTHORS

MAMUTOV Vyacheslav S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vmamutov@mail.ru

SHAPOSHNIKOV Igor A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: shap.igor@mail.ru

УДК 539.2–022.532

И.В. Аносова, Т.П. Дьячкова, Н.В. Орлова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ПОЛИАНИЛИНОМ

I.V. Anosova, T.P. Dyachkova, N.V. Orlova

STUDY OF MODIFICATION OF CARBON DISPERSED SUPPORTS WITH POLYANILINE

Изучены кинетические закономерности окислительной полимеризации анилина на поверхности углеродных дисперсных носителей (углеродные нанотрубки, многослойный окисленный графен). Установлена взаимосвязь между структурой, свойствами полученных нанокompозитов и морфологическими особенностями подложки.

ПОЛИАНИЛИН; УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ; МНОГОСЛОЙНЫЙ ОКИСЛЕННЫЙ ГРАФЕН; МОДИФИЦИРОВАНИЕ; ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ.

The kinetics of the oxidative polymerization of aniline on the surface of carbon dispersed supports (carbon nanotubes, oxidized graphene nanoplates) was studied. The relationship between structure and properties of obtained nanocomposites with the morphological characteristics of the substrate was shown.

POLYANILINE; CARBON NANOTUBES; OXIDIZED GRAPHENE NANOPATES; MODIFICATION; OXIDATIVE POLYMERIZATION.

Создание гибридных материалов для электрохимических элементов и суперконденсаторов на основе дисперсных носителей, модифицированных электропроводящими полимерами, типичным представителем которых является полианилин (ПАНИ) [1–4], — перспективное направление современной науки и технологии.

Электропроводность ПАНИ меньше, чем у таких материалов, как углеродные нанотрубки (УНТ) или графен. Для применений, где важно достигнуть максимальной мощности, электропроводность чистого полианилина недостаточна. Кроме того, структура ПАНИ может перестраиваться в ходе окислительно-восстановительных превращений. Это может приводить к изменению пористой структуры, а также к деградации полимерной цепи ПАНИ и, как следствие, к снижению характеристик суперконденсатора или другого химического источника тока, где используется электрод на основе ПАНИ, при многократном повторении циклов заряда — разряда [5–7]. Одно из решений этой проблемы — создание нанокompозитов типа ПАНИ+проводящий наноматериал (УНТ, графен). В частности, в [8]

показано, что такие композиционные материалы, как многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ)+ПАНИ, обладают высокой стабильной электропроводностью и электрической емкостью, и указаны перспективные направления их применения. В [9] сообщается о термоэлектрических свойствах модифицированного полианилином многослойного графена.

Цель настоящей работы — исследовать закономерности окислительной полимеризации анилина на поверхности нанокompозитов углеродных дисперсных носителей и свойства полученных материалов.

Были использованы нативные и предварительно окисленные углеродные нанотрубки «Таунит-М» ($d = 8–15$ нм, $l \geq 2$ мкм, $S_{уд} = 300–320$ м²/г) и «Таунит-МД» ($d = 30–80$ нм, $l \geq 20$ мкм) производства ООО «Нанотехцентр» (Тамбов). Степень функционализации окисленных УНТ карбоксильными группами составляла от 0,2 до 1,3 ммоль COOH-групп на 1 г УНТ. Для использованного в работе многослойного окисленного графена (МГО) характерна чешуйчатая структура, средняя толщина отдельных струк-

турных единиц составляла около 5 нм. Чешуйки имели на периферии графеновых слоев кислородсодержащие группы, что улучшает совместимость этого материала со многими полимерами, в том числе с макромолекулами полианилина. Для стабилизации водных дисперсий МГО в ряде экспериментов применялся диспергатор НФ. Осаждение ПАНИ проводилось методом окислительной полимеризации под действием персульфата аммония.

Температурные профили окислительной полимеризации анилина на поверхности всех исследованных нанокремниевых носителей указы-

вают на экзотермический характер процесса (рис. 1). При синтезе полианилина в отсутствие дисперсного носителя в начале реакции наблюдается индукционный период, в течение которого температура практически не изменяется. За ним следует участок резкого подъема температуры. Введение темплата в реакционную смесь способствует значительному сокращению продолжительности индукционного периода вплоть до полного отсутствия. Ускоряющее действие нанокремниевых носителей на данную реакцию связывают как с появлением дополнительных поверхностей для адсорбции олигомерных

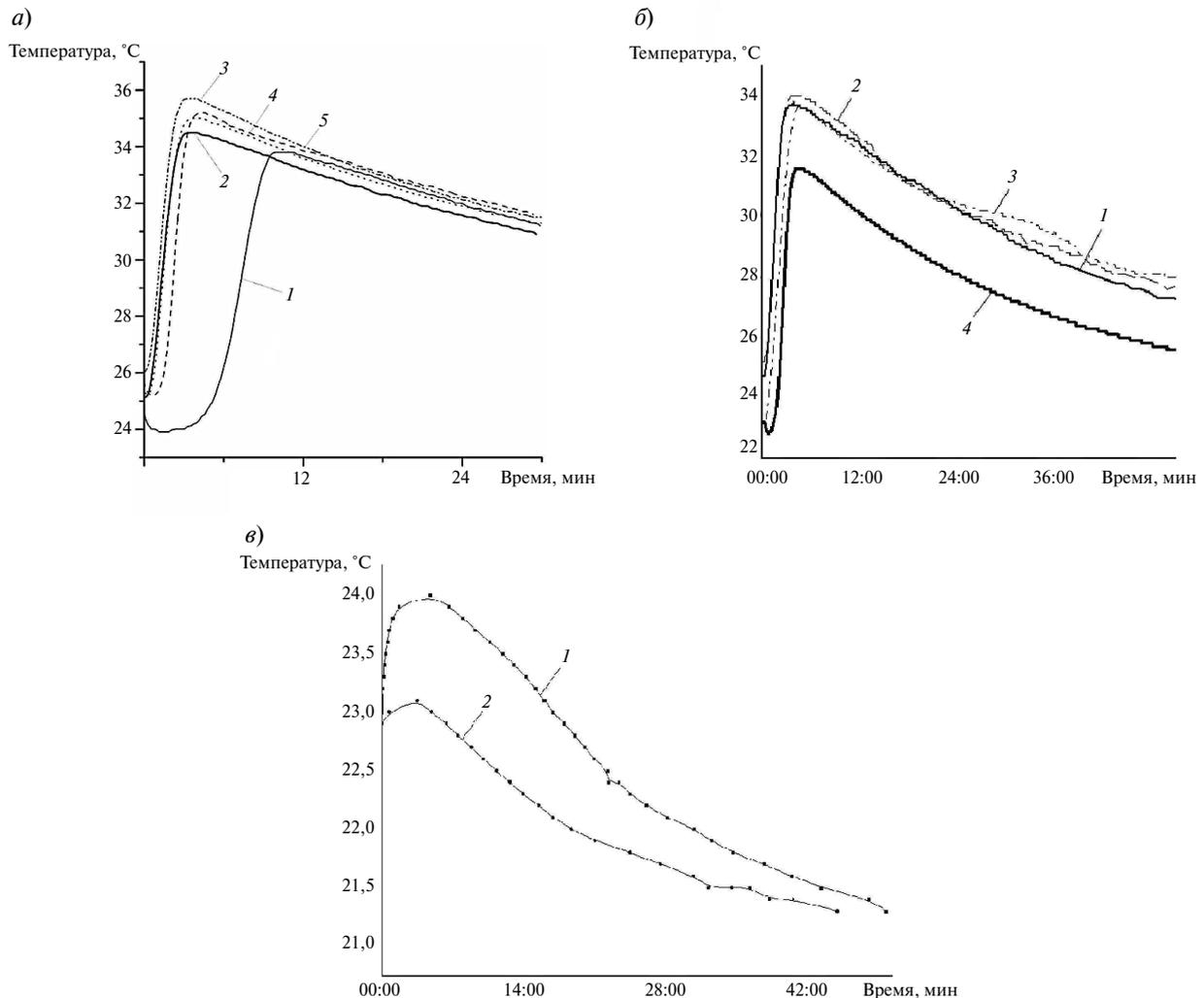


Рис. 1. Температурные профили реакции окислительной полимеризации анилина: а — без УНТ (1), в присутствии исходных (2) и предварительно окисленных УНТ «Таунит-М» со степенью функционализации СООН-группами (ммоль/г), равной 0,2 (3), 0,65 (4), 1,3 (5); б — в присутствии исходных (1) и предварительно окисленных УНТ «Таунит-МД» со степенью функционализации СООН-группами (ммоль/г), равной 0,4 (2), 0,6 (3), 1,1 (4); в — на поверхности МГО в исходной (1) и стабилизированной диспергатором НФ (2) водной суспензии с содержанием МГО 2,5 г/л

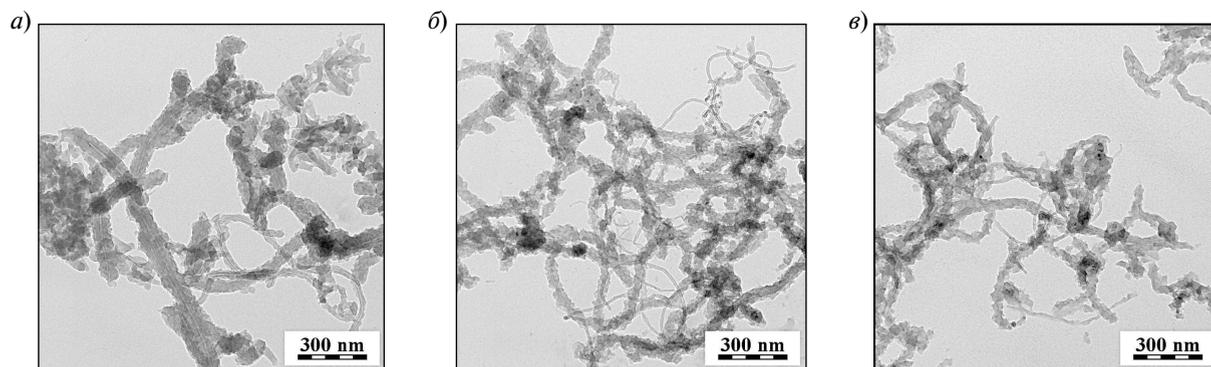


Рис. 2. ТЕМ-изображения исходных (а) и предварительно окисленных (б, в) УНТ «Таунит-МД». Степень функционализации (ммоль/г): б — 0,6; в — 1,1

фрагментов, так и с более легкой передачей электронов от окисляющейся частицы к восстанавливающейся благодаря электропроводящим свойствам подложки [10].

Наличие карбоксильных групп на поверхности УНТ не влияет на скорость реакции, но способствует дополнительному протеканию процессов, сопровождающихся незначительным выделением теплоты, о чем свидетельствуют более высокие значения температур в точках экстремумов на кривых рис. 1, а. Вероятно, экзотермическими являются процессы взаимодействия олигомерных зародышей полианилиновых цепочек с карбоксильными группами.

При использовании предварительно стабилизированной диспергатором НФ суспензии графена значение температуры в точке экстремума снижается.

Наличие карбоксильных групп на поверхности УНТ способствует более равномерному покрытию их полианилином. Изменение тол-

щины полианилинового покрытия с ростом степени функционализации УНТ не наблюдается (рис. 2).

На поверхности МГО макромолекулы полианилина формируют относительно однородный слой (рис. 3).

Полианилин, полученный методом окислительной полимеризации, представляет собой проводящую протонированную эмеральдиновую соль. Величина ее удельного электрического сопротивления нестабильна и может изменяться в зависимости от состава электролита, кислотности среды и других внешних условий на порядки. В то же время углеродные наноматериалы обладают высокой стабильной электропроводностью.

Предварительная функционализация углеродных нанотрубок карбоксильными группами влияет на электрофизические свойства композитов неоднозначно (табл. 1). Снижение электропроводности при значительных величинах степени функционализации поверхности УНТ карбоксильными группами можно объяснить усилением взаимодействия УНТ с полианилином и сопровождающим его ослаблением взаимодействия отдельных УНТ друг с другом. При этом фрагменты перколяционной сетки оказываются изолированными друг от друга прослойками из менее электропроводного полианилина.

Композиты ПАНИ+МГО с более высоким содержанием нанокремнеземного компонента характеризуются хорошей электропроводностью; наличие ПАВ в реакционной смеси при их синтезе практически не сказывается на величине удельного электрического сопротивления (табл. 2).

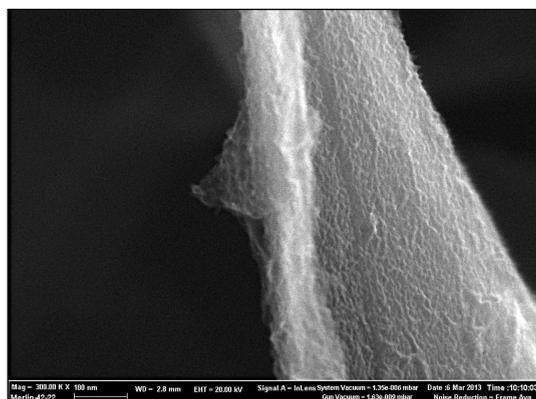


Рис. 3. SEM-изображение композита окисленного многослойного с полианилином

Таблица 1

Удельное электросопротивление ПАНИ и его композитов с УНТ при различных значениях степени функционализации

| Название параметра, ед. изм. | ПАНИ | ПАНИ+«Таунит-М» | | | | ПАНИ+«Таунит-МД» | | | |
|--------------------------------------|------|-----------------|-----|------|-----|------------------|-----|-----|-----|
| Степень функционализации, ммоль/г | — | 0 | 0,2 | 0,65 | 1,3 | 0 | 0,4 | 0,6 | 1,1 |
| Удельное электросопротивление, Ом·см | 200 | 5,8 | 2,5 | 4,1 | 2,9 | 2,4 | 1,3 | 2,5 | 2,3 |

Таблица 2

Удельное электрическое сопротивление композитов ПАНИ+МГО

| Содержание МГО, г/л | Диспергатор | Удельное электрическое сопротивление, Ом·см |
|---------------------|-------------|---|
| 1,0 | — | 3,6 |
| 2,5 | | 0,45 |
| 1,0 | НФ | 1,2 |
| 2,5 | | 0,45 |

Однако при получении материалов с меньшим содержанием МГО, введение диспергатора НФ способствует улучшению проводящих свойств.

В ходе исследования выявлены влияние природы дисперсного носителя на закономерности окислительной полимеризации анилина и сложный механизм протекающих процессов.

В результате проведенной работы сделаны следующие обобщения и выводы:

1. Процессы окислительной полимеризации анилина на поверхности нанокремниевых носителей — экзотермические. Максимум на температурных кривых тем выше, чем больше величина удельной поверхности темплата. Наличие дисперсной подложки в реакционной

массе снижает продолжительность индукционного периода реакции и способствует снижению доли побочных процессов при образовании олигомеров.

2. Кислородсодержащие функциональные группы на поверхности УНТ и МГО способствуют формированию качественного полианилинового покрытия при модифицировании.

3. Для получения композитов с наилучшими характеристиками необходим подбор оптимальной степени предварительной функционализации нанокремниевых носителей кислородсодержащими группами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-03-97555).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bhadra S., Khastgir D., Singha N.K., Lee J.H. Progress in preparation, processing and applications of polyaniline. *Progress in Polymer Science*. 2009.— Vol. 34. P. 783–810.
2. Zhou Y., Qin Z.-Y., Li L., Zhang Y., Wei Y.-L., Wang L.-F., Zhu M.-F. Polyaniline/multi-walled carbon nanotube composites with core-shell structures as supercapacitor electrode materials. *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55. P. 3904–3908.
3. Wang H., Hao Q., Yang X., Lu L., Wang X. Graphene oxide doped polyaniline for supercapacitors. *Electrochemistry Communications*. 2009. Vol. 11. P. 1158–1161.
4. He B.-L., Dong B., Wang W., Li H.-L. Performance of polyaniline/multi-walled carbon nanotubes composites as cathode for rechargeable lithium batteries. *Materials Chemistry and Physics*. 2009. Vol. 114. P. 371–375.
5. Snook G.A., Kao P., Best A.S. Conducting-polymer-based supercapacitor devices and electrodes. *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196. P. 1–12.
6. Mandić Z., Roković M.K., Pokupčić T. Polyaniline as cathodic material for electrochemical energy sources. The role of morphology. *Electrochimica Acta*. 2009. Vol. 54. P. 2941–2950.
7. Lu X., Zhang W., Wang C., Wen T.-C., Wie Y. One-dimensional conducting polymer nanocomposites: Syn-

thesis, properties and applications. *Progress in Polymer Science*. 2011. Vol. 36. P. 671–712.

8. Дьячкова Т. П., Филатова Е. Ю., Горский С. Ю., Шуклинов А. В., Ткачев А. Г., Мищенко С. В. Модифицирование многослойных углеродных нанотрубок полианилином и исследование свойств полученных материалов // Композиты и наноструктуры. 2013. №1. С. 5–18.

9. Xiang J., Drzal L.T. Templated growth of polyaniline on exfoliated graphene nanoplatelets (GNP) and its thermoelectric properties. *Polymer*. 2012. Vol. 53. P. 4202–4210.

10. Konyushenko E.N., Stejskal J., Trchova M.a, Hradil J., Kovařova. J., Prokeř J., Cieslar M., Hwang J.-Y., Chen K.-H., Sapurina I. Multi-wall carbon nanotubes coated with polyaniline. *Polymer*. 2006. Vol. 47. P. 5715–5723.

REFERENCES

1. Bhadra S., Khastgir D., Singha N.K., Lee J.H. Progress in preparation, processing and applications of polyaniline. *Progress in Polymer Science*. 2009. Vol. 34. P. 783–810.

2. Zhou Y., Qin Z.-Y., Li L., Zhang Y., Wei Y.-L., Wang L.-F., Zhu M.-F. Polyaniline/multi-walled carbon nanotube composites with core-shell structures as supercapacitor electrode materials. *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55. P. 3904–3908.

3. Wang H., Hao Q., Yang X., Lu L., Wang X. Graphene oxide doped polyaniline for supercapacitors. *Electrochemistry Communications*. 2009. Vol. 11. P. 1158–1161.

4. He B.-L., Dong B., Wang W., Li H.-L. Performance of polyaniline/multi-walled carbon nanotubes composites as cathode for rechargeable lithium batteries. *Materials Chemistry and Physics*. 2009. Vol. 114. P. 371–375.

5. Snook G.A., Kao P., Best A.S. Conducting-polymer-based supercapacitor devices and electrodes. *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196. P. 1–12.

6. Mandić Z., Roković M.K., Pokupčić T. Polyaniline as cathodic material for electrochemical energy sources

The role of morphology. *Electrochimica Acta*. 2009. Vol. 54. P. 2941–2950.

7. Lu X., Zhang W., Wang C., Wen T.-C., Wie Y. One-dimensional conducting polymer nanocomposites: Synthesis, properties and applications. *Progress in Polymer Science*. 2011. Vol. 36. P. 671–712.

8. Dyachkova T.P., Filatova Ye.Yu., Gorskiy S.Yu., Shuklinov A.V., Tkachev A.G., Mishchenko S.V. Modifikirovaniye mnogosloynnykh uglerodnykh nanotrubok polianilinom i issledovaniye svoystv poluchennykh materialov. *Kompozity i nanostruktury*. 2013. №1. S. 5–18. (rus.)

9. Xiang J., Drzal L.T. Templated growth of polyaniline on exfoliated graphene nanoplatelets (GNP) and its thermoelectric properties. *Polymer*.— 2012. Vol. 53. P. 4202–4210.

10. Konyushenko E.N., Stejskal J., Trchova M.a, Hradil J., Kovařova. J., Prokeř J., Cieslar M., Hwang J.-Y., Chen K.-H., Sapurina I. Multi-wall carbon nanotubes coated with polyaniline. *Polymer*. 2006. Vol. 47. P. 5715–5723.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АНОСОВА Ирина Владимировна — магистрант Тамбовского государственного технического университета; 392000, ул.Советская, 106, г.Тамбов, Россия; e-mail: anosowa_i_w@mail.ru.

ДЬЯЧКОВА Татьяна Петровна — кандидат химических наук доцент кафедры техники и технологий производства нанопроductов Тамбовского государственного технического университета; 392000, ул.Советская, 106, г.Тамбов, Россия; e-mail: mashtatpetr@mail.ru.

ОРЛОВА Наталия Вячеславовна — кандидат технических наук доцент кафедры технологических процессов, аппаратов и техносферной безопасности Тамбовского государственного технического университета; 392000, ул.Советская, 106, г.Тамбов, Россия; e-mail: vnvpri@mail.ru

AUTHORS

ANOSOVA Irina V. — Tambov State Technical University; 392000, *Sovetskaya St*, 106, Tambov, Russia; anosowa_i_w@mail.ru

DYACHKOVA Tatiana P. — Tambov State Technical University; 392000, *Sovetskaya St*, 106, Tambov, Russia; e-mail: mashtatpetr@mail.ru

ORLOVA Nataliya V. — Tambov State Technical University; 392000, *Sovetskaya St*, 106, Tambov, Russia; e-mail: mashtatpetr@mail.ru.



УДК 621.983.044

А.В. Мамутов, В.С. Мамутов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ЛИСТОВОЙ ФОРМОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСА LS-DYNA

A.V. Mamutov, V.S. Mamutov

SIMULATING THE ELECTRO-HYDRAULIC SHEET METAL FORMING USING LS-DYNA

Разработана методика моделирования электрогидроимпульсной листовой формовки при помощи конечно-элементного комплекса LS-DYNA, в которой учитывается реальная форма разрядной камеры с соосным расположением электродов и задается полученная экспериментально функция выделения энергии в канале разряда. Представлен пример компьютерного расчета динамики формы плазменной полости канала разряда, давления в разрядной камере, деформации заготовки для процесса вытяжки тонколистовой стали 12X18H10T. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных осуществлялось по прогибу заготовки и интенсивности тензора деформаций.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ЛИСТОВАЯ ФОРМОВКА; РАЗРЯДНАЯ КАМЕРА С СООСНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ; ФУНКЦИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В КАНАЛЕ РАЗРЯДА; КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ КОМПЛЕКС LS-DYNA; ВЫТЯЖКА ТОНКОЛИСТОВОЙ СТАЛИ 12X18H10T.

The technique of simulating the electro-hydraulic sheet metal forming process using finite element complex LS-DYNA is developed. The numerical model takes into account the actual geometry of the discharge chamber with coaxial electrodes as well as experimentally obtained function of energy input in the discharge channel. The results of simulation of electro-hydraulic drawing of stainless steel blank including the shape of the discharge channel, distribution of pulse pressure, and deformation of the blank are presented. The developed model is validated by comparing the numerically predicted and experimentally measured parameters of the blank in a final state after discharge.

ELECTRO-HYDRAULIC SHEET-METAL FORMING; DISCHARGE CHAMBER WITH COAXIAL ELECTRODES; FUNCTION OF ENERGY DEPOSITION IN THE DISCHARGE CHANNEL; COMPUTER SIMULATION; FINITE-ELEMENT CODE LS-DYNA; DEEP DRAWING OF THIN SHEET STAINLESS BLANK.

Электрогидроимпульсная штамповка (ЭГИШ) применяется в условиях мелкосерийного и индивидуального производства для изготовления деталей из листовых, тонколистовых и особо тонколистовых металлов [1–3]. Одна из особенностей ЭГИШ — возможность создания оптимальных параметров импульсного давления (фронт, амплитуда, общая длительность), требуемых для конкретной технологической операции. Эти параметры определяются разрядным контуром электрогидроимпульсной установки, конструкциями разрядной камеры и инструмента, свойствами жидкости и деформируемой заготовки. Большое число факторов, влияющих на процесс преобразования электрической энер-

гии конденсаторной батареи в полезную энергию пластического деформирования заготовки, затрудняет экспериментальные подходы к определению оптимальных параметров нагружения заготовки. Это приводит к созданию неэффективных технологий ЭГИШ, потерям времени и денег при их отладке. Поэтому компьютерное моделирование ЭГИШ на этапе разработки проектирования процесса. Комплекс LS-DYNA [4] — один из наиболее эффективных конечно-элементных комплексов для компьютерного моделирования процессов импульсного деформирования металлов, в том числе ЭГИШ. Он позволяет рассчитать волновое взаимодействие

между плазменным каналом и рабочей жидкостью, рабочей жидкостью и деформируемой заготовкой, а также заготовкой и инструментом. Расчет физико-механических процессов при ЭГИШ с использованием комплекса LS-DYNA стал возможным после отладки методики моделирования взаимодействия листовой заготовки с жидкостью и с рабочим инструментом [5, 6]. Моделирование физико-механических процессов в целом стало возможным после разработки модели канала разряда в комплексе LS-DYNA 971 [7, 8]. Цель настоящей работы — разработка методики компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых металлов с учетом реальной трехмерной конфигурации разрядной камеры и электродов.

**Исходные данные
для компьютерного моделирования**

Рассматривалось компьютерное моделирование электрогидроимпульсной вытяжки тонколистовой заготовки с применением разрядной камеры с соосным расположением электродов, схема которой с основными размерами представлена на рис. 1

Эксперименты проводились на электроимпульсной установке с максимальным напряжением заряда конденсаторной батареи $U_0 = 6$ кВ, емкостью конденсаторной батареи $C = 300$ мкФ, индуктивностью подводов $L = 0,878$ мкГн. В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода с добавлением поваренной соли для увеличения межэлектродного расстояния d (см. рис. 1) при относительно низком напряжении заряда конденсаторной батареи. Изоляция электродов была выполнена из стеклотекстолита (стекловолокно, намотанное на металлическую часть электродов и пропитанное эпоксидной смолой).

Функция мощности выделения электрической энергии в канале разряда определялась через экспериментально измеренные параметры разрядного тока $i(t)$ и напряжения на электродах $u(t)$:

$$N(t) = u(t)i(t).$$

В качестве исходных данных в компьютерном расчете задавалась удельная мощность выделения энергии

$$N^* = N(t)/V_0,$$

где V_0 — начальный объем разрядного канала.

Разрядный ток измерялся поясом Роговского с интегрирующей цепочкой, а напряжение —

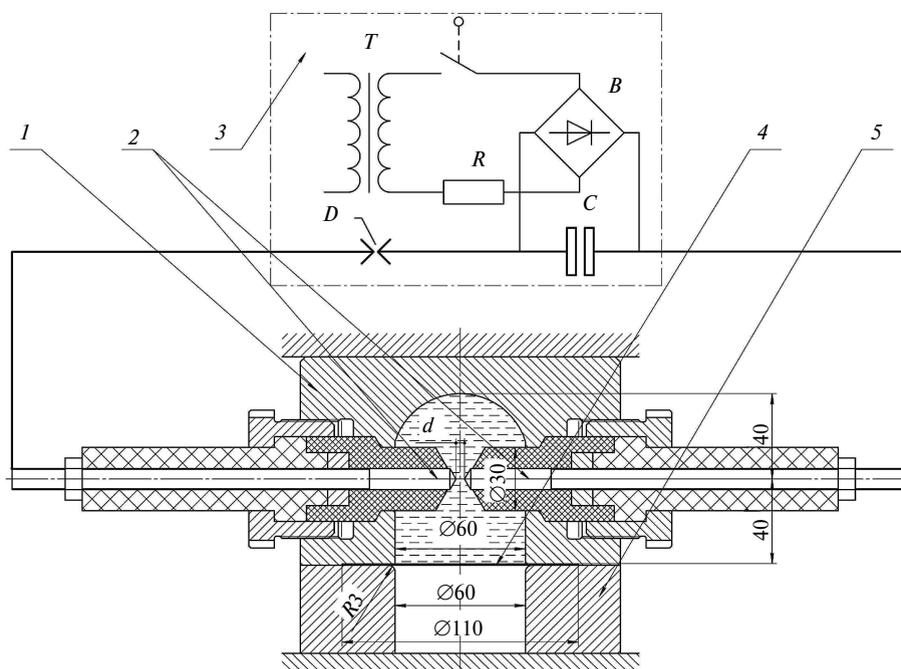


Рис. 1. Схема электрогидроимпульсной вытяжки тонколистового металла:
1 — разрядная камера с водой; 2 — электроды; 3 — электрогидроимпульсная установка;
4 — листовая заготовка; 5 — матрица

при помощи делителя импульсных напряжений. Чтобы электромагнитные наводки, возникающие в элементах делителя напряжений, не сильно искажали функцию мощности, при обработке использовались отдельные точки осциллограмм, где эти наводки не сказываются [9], а именно, где

$$i(t) = 0, \\ di/dt = 0.$$

В эти моменты времени сигнал делителя соответствует чисто активному сопротивлению. После обработки осциллограмм тока и напряжения удельная мощность от времени задавалась кусочно-линейной функцией

$$N^* = N^*_1 t / t_1 \text{ при } t < t_1; \\ N^* = N^*_1 (t_2 - t) / (t_2 - t_1) \text{ при } t_1 < t < t_2; \\ N^* = N^*_2 (t - t_2) / (t_3 - t_2) \text{ при } t_2 < t < t_3; \\ N^* = N^*_2 (t_4 - t) / (t_4 - t_3) \text{ при } t_3 < t < t_4; \\ N^* = 0 \text{ при } t > t_4$$

со следующими параметрами: $t_1 = 24$ мкс, $t_2 = 49$ мкс, $t_3 = 76$ мкс; $t_4 = 102$ мкс, $N^*_1 = 2,457$ МВт/мм³; $N^*_2 = 1,323$ МВт/мм³.

Заготовки выполнялись из стали 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм, для которой экспериментальная зависимость между напряжением текучести σ_s и интенсивностью тензора логарифмических деформаций ε_i аппроксимировалась степенным соотношением

$$\sigma_s = B_d \varepsilon_i^m, \\ B_d = k_d B,$$

где $m = 0,29$, $B = 1180$ МПа — параметры аппроксимации статической кривой деформационного упрочнения; $k_d = 1,15$ — коэффициент динамичности, учитывающий влияние высокой скорости деформаций при ЭГИШ. Предполагалось, что материал заготовки — изотропный.

Компьютерная модель процесса

Предполагалась адиабатичность стенок разрядного канала и слабое влияние дополнительного испарения жидкости на размеры канала [10]. Для моделирования канала разряда использовалось уравнение баланса энергии

$$\frac{d}{dt} \frac{p_k V_k}{\gamma - 1} + V_k \frac{dV_k}{dt} = N(t), \quad (2)$$

где $\gamma = 1,26$ — показатель адиабаты для плазмы, образованной из водопроводной воды; V_k и p_k —

объем канала и давление в нем; $N(t)$ — мощность выделения энергии в канале.

Материалы электродов, как и стенок камеры, полагались абсолютно жесткими, что допустимо (в сравнении со сжимаемостью рабочей жидкости). Эти материалы моделировались как *MAT_RIGID*.

При моделировании воды в комплексе LS-DYNA использовалась модель идеальной сжимаемой жидкости *MAT_ELASTIC_FLUID*, в которой зависимость между давлением и плотностью имеет вид

$$p = -K \ln(\rho_0/\rho),$$

где ρ — плотность воды, $\rho_0 = 1000$ кг/м³ — начальная плотность; K — модуль объемного сжатия. Аппроксимация адиабаты Тэта в пределах $p \in [0, 1-100]$ МПа дает значение $K \cong 2,35$ ГПа. Предполагалось, что вода не выдерживает отрицательного давления больше $1 \cdot 10^5$ Па.

Для особо тонколистового металла предполагалось целесообразным моделировать заготовку оболочкой с заданием в *SECTION_SHELL* в качестве формулировки элементов оболочки опции *ELFORM = 16* для полноинтегрируемого оболочечного элемента. В качестве материала выбрана модель *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY* со следующими параметрами степенной кривой деформационного упрочнения: $B = 1357$ МПа, $m = 0,29$. Задавались упругие константы материала: $E = 202$ ГПа — модуль Юнга; $\nu = 0,31$ — коэффициент Пуассона; плотность $\rho = 7800$ кг/м³. Коэффициент кулоновского трения $\mu = 0,2$ для трения покоя и $\mu = 0,15$ при движении заготовки. Зазор между прижимом и матрицей был постоянным и равным 0,21 мм.

В качестве модели материала для плазменного канала использовалась модель *MAT_NULL*, определяющая начальную плотность плазмы ρ_{p0} совместно с уравнением состояния *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK*, определяемым уравнением баланса энергии (2). При этом в качестве зависимости, задающей ввод энергии, принимались соотношения (1). Начальная плотность плазмы задавалась $\rho_{p0} = 500$ кг/м³. Начальный объем канала — $V_0 = 2$ мм³. Для расчета плазмы и жидкости использовался алгоритм ALE, что совместно с техникой Multi-Material и FSI (Fluid-Structure Interaction) позволяет решить проблему искажения сетки и рассчитать процессы с камерами сложной формы.

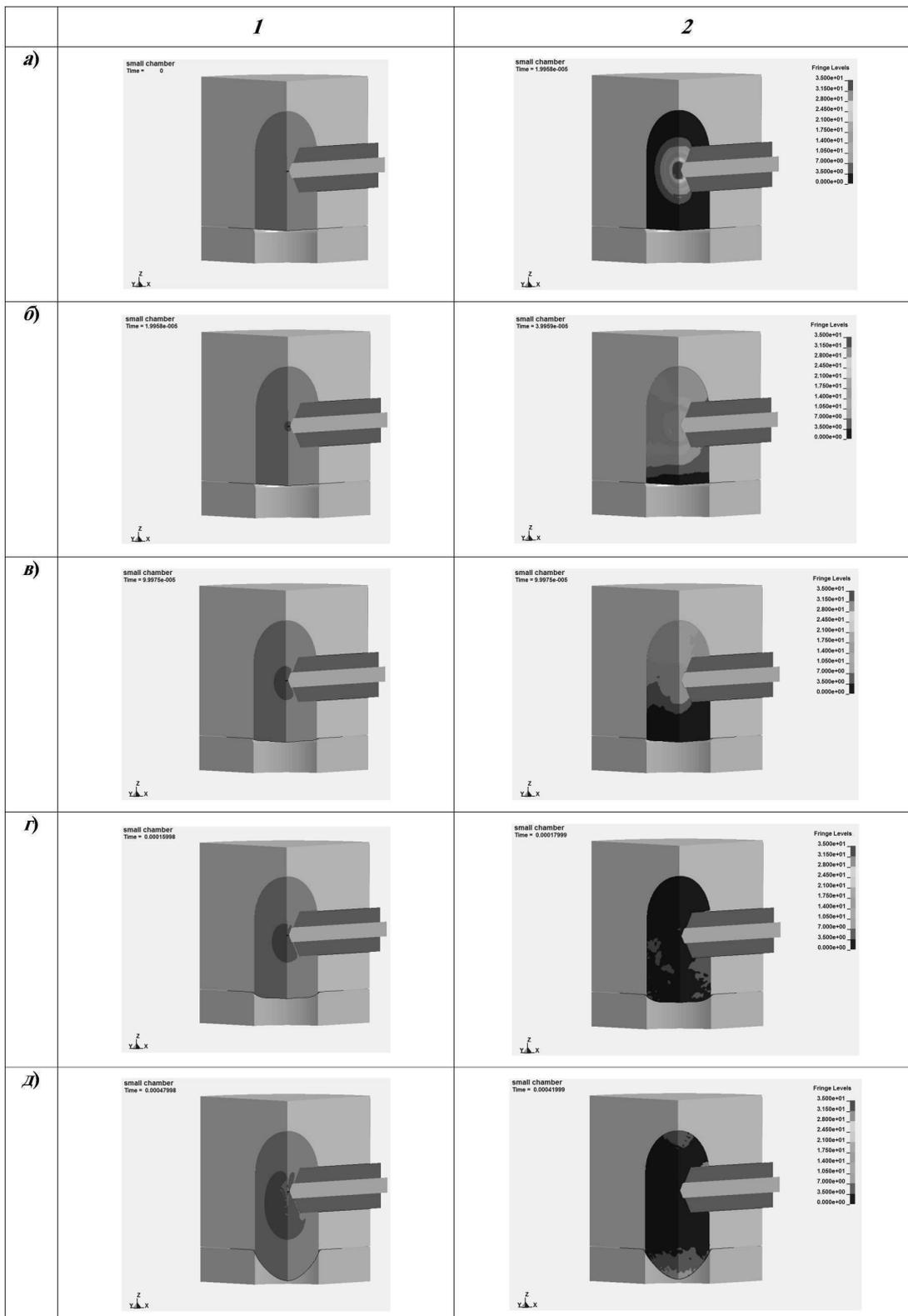


Рис. 2. Динамика развития плазменной полости (*1*) и давления в разрядной камере (*2*):
 $1a - t = 0$, $1б - t = 20$, $1в - t = 100$, $1г - t = 160$, $1д - t = 480$; $2a - t = 20$, $2б - t = 40$, $2в - t = 100$,
 $2г - t = 180$, $2д - t = 420$ (время t – в мкс)

Результаты расчетов

Особенность размеров выбранной разрядной камеры — относительно малый ее объем (меньше 1 литра). Поэтому специфика результатов расчета в значительной степени будет определяться данным фактором. Для камер большого объема, для заготовки и функции выделения энергии с другими характеристиками можно ожидать отличий в картине давлений в жидкости, протекании процесса нагружения и деформировании заготовки.

С учетом плоскости симметрии для уменьшения времени счета использовалась геометрическая модель $\frac{1}{4}$ части камеры (см. рис. 1).

На рис. 2 показано развитие канала разряда, формы жидкости и заготовки (1), а также давление в разрядной камере (2) для характерных стадий процесса. Начальный канал разряда (1а) превращается в сферу (1б, 1в). Дальше на форме полости начинает сказываться геометрия электродов и податливость заготовки, смещающая полость в сторону заготовки (1в, 1г). В конце процесса деформирования полость разрушается на фрагменты (1д). Картина давления в камере сильно меняется на этапе выделения энергии в канале разряда (2а, 2б, 2в). Область повышенного давления возникает в районе купола камеры (2б, 2в). При начале деформирования заготовки давление в значительной степени выравнивается по объему камеры (2г, 2д). Деформирование заготовки практически осуществляется за счет кинетической энергии движущейся жидкости — гидротока.

Изменение давления в разрядной камере во времени для двух характерных точек показано на рис. 3. Видна разница в форме давлений в жидкости вблизи плазменной полости и вблизи заготовки. При начале движения заготовки давление в камере падает.

Для оценки корректности расчетов используются величины интенсивности тензора логарифмических деформаций в заготовке и максимального прогиба. Для центральной точки заготовки эффективная деформация совпадает с интенсивностью тензора логарифмических деформаций ε_{i0} , величина которой в эксперименте может быть определена по утонению:

$$\varepsilon_{i0} = \ln(h_0/h),$$

где h_0 — начальная толщина материала заготовки, h — толщина материала после деформирования.

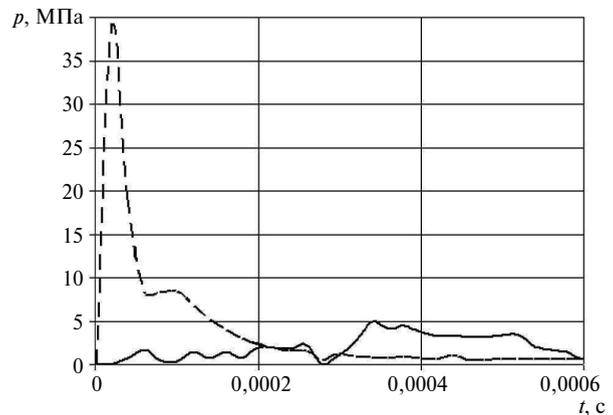


Рис. 3. Давление в жидкости: сплошная линия — на нижней границе плазменной полости, пунктирная — вблизи центра заготовки

Листовая заготовка после остановки движения представлена на рис. 4, а. Для пяти характерных точек заготовки представлены зависимости эффективных деформаций от времени (рис. 4, б). Следует отметить, что деформации в точках по плоскостям вдоль и поперек оси электродов практически совпадают (кривые 2, 3 и 4, 5). Это показывает, что для камеры данного объема при длительности выделения энергии порядка 100 мкс электродная система практически не влияет на распределение деформаций в заготовке в окружном направлении.

Результаты расчетов, представленные на рис. 4, сопоставлялись с экспериментальными данными. Для центральной точки заготовки экспериментальные значения максимального прогиба составили $16,1 \pm 0,08$ мм, а интенсивности тензора логарифмических деформаций — $\varepsilon_{i0} = 0,21 \pm 0,04$. Эксперимент проводился для 5 образцов. Погрешность задания напряжения разряда конденсаторной батареи не превышала 2%. Доверительные интервалы рассчитывались для вероятности 95%. Соответствующие расчетные значения были: максимальный прогиб — 19,42 мм, эффективная деформация — 0,2831 (кривая 1 на горизонтальном участке, рис. 4). Относительная разница деформаций в окружных направлениях (кривые 2, 3 и 4, 5 на рис. 4) в эксперименте также не превышала 2–3%.

На основе техники ALE с применением программного комплекса LS-DYNA 971 разработана методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения

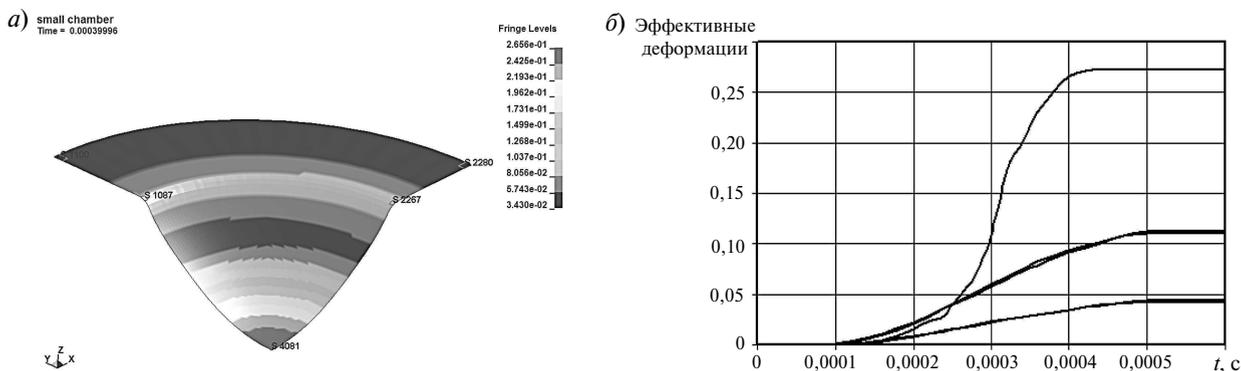


Рис. 4. Деформация листовой заготовки:

a — распределение эффективных деформаций после остановки заготовки; *b* — зависимость эффективных деформаций от времени для центральной точки (1), вблизи радиуса закругления кромки матрицы (2, 3) и на краю заготовки (4, 5)

тонколистовых металлов с учетом реальной трехмерной конфигурации разрядной камеры и электродов. Методика апробирована для варианта вытяжки тонколистовой заготовки в камере малого объема. Анализ результатов расчета показывает, что для камер малого объема до начала движения заготовки распределение давления в камере сильно неравномерное. При деформировании заготовки давление выравнивается, и влияние

электродов практически не сказывается на характере деформаций в окружном направлении заготовки. Компьютерный расчет позволяет оценивать гидродинамические параметры в жидкости и напряженно-деформированное состояние точек заготовки для процесса ЭГИШ и на этой базе создавать научно обоснованные технологии и технологические устройства для изготовления конкретных деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здор, Г.Н. Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования металлов Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
2. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: ХАИ, 2011. 272 с.
3. Golovashchenko S., Mamutov V. Electrohydraulic Forming of Automotive Panels / Sixth Global Innovations Symposium: Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries // Proc. of TMS. San Francisco. 2005. P. 65–70.
4. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA. 2006. 498 p.
5. Мамутов В.С. Компьютерные расчеты листовой электрогидроимпульсной формовки в закрытую матрицу произвольной формы // Матер. VII Международной школы-семинара «Импульсные процессы в механике сплошных сред». Николаев: Изд-во института импульсных процессов и технологий НАН Украины, 2007. С. 58–60.
6. Mamutov A.V., Mamutov V.S. Computer simulation of electrohydraulic sheet metal forming / International workshop: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering // Proc. of SPIE. Vol. 6297. Olsztyn. 2007. P. OY1–5.
7. Головащенко С.Ф., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Применение комплекса LS-DYNA для расчета канала разряда при электрогидроимпульсной штамповке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. №2(147). Т.1. С. 116–121.
8. Головащенко С.Ф., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых металлов с применением программного комплекса LS-DYNA 971 // Металлообработка. 2012. № 4 (69). С. 23–29.
9. Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 208 с.
10. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды. М: Наука, 1971. 155 с.

REFERENCES

1. **Zdor G.N., Isaevich L.A., Kachanov I.V.** Tekhnologii vysokoskorostnogo deformirovaniya metallov. Minsk: BNTU, 2010. 456 p. (rus.)
2. **Taranenko M.E.** Elektrogidravlicheskaya shtampovka: teoriya, oborudovanie, tekhnoprotsessy. Khar'kov: KhAI, 2011. 272 p. (rus.)
3. **Golovashchenko S., Mamutov V.** Electrohydraulic Forming of Automotive Panels. Sixth Global Innovations Symposium Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries. *Proc. of TMS*. San Francisco. 2005. P. 65–70.
4. **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual / Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA. 2006. 498 p.
5. **Mamutov V.S.** Komp'yuternye raschety listovoi elektrogidroimpul'snoi formovki v zakrytuiu matritsu proizvod'noi formy. *Materialy VII Mezhdunarodnoy shkoly-seminara «Impul'snye protsessy v mekhanike sploshnykh sred*, Nikolaev, 2007. P. 58–60. (rus.)
6. **Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Computer simulation of electrohydraulic sheet metal forming. *International workshop: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering. Proc. of SPIE*. Vol. 6297. Olsztyn, 2007. P. OY1–5.
7. **Golovashchenko S.F., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Primenenie kompleksa LS-DYNA dlya rascheta kanala razryada pri elektrogidroimpul'snoi shtampovke. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU: Nauka i obrazovanie*. 2012. № 2(147). T.1. P. 116–121. (rus.)
8. **Golovashchenko S.F., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Metodika komp'yuternogo modelirovaniia elektrogidroimpul'snogo formoizmeneniia tonkolistovykh metallov s primeneniem programmnoho kompleksa LS-DYNA 971. *Metalloobrabotka*. 2012. № 4 (69). P. 23–29. (rus.)
9. **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.** Metody issledovaniia vysokoskorostnogo deformirovaniia metallov. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 208 p. (rus.)
10. **Naugol'nykh K.A., Roy N.A.** Elektricheskie razriady v vode. Moscow: Nauka, 1971. 155 p. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович — доктор технических наук профессор кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vmamutov@mail.ru

МАМУТОВ Александр Вячеславович — кандидат технических наук, приглашенный ученый Оклендского университета; e-mail: a.mamutov@yahoo.com

AUTHORS

MAMUTOV Viacheslav S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vmamutov@mail.ru

MAMUTOV Alexander V. — Oakland University, 2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309, USA; e-mail: A.Mamutov@yahoo.com

УДК 661.66

С.Ю. Горский, Т. П. Дьячкова, Е.А. Буракова

ГАЗОФАЗНАЯ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК: ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА

S.Yu. Gorski, T.P. Dyachkova, E.A. Burakova

GAS-PHASE FUNCTIONALIZATION OF CARBON NANOTUBES: PROBLEMS OF IMPLEMENTATION OF THE METHOD

Исследованы важнейшие закономерности процессов газофазной окислительной функционализации углеродных нанотрубок серии «Таунит» в парах азотной кислоты, изучены некоторые их свойства. Оценены возможности и условия масштабирования данного метода до опытно-промышленного производства.

КОВАЛЕНТНАЯ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ; ОКИСЛЕНИЕ; ТАУНИТ; УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ.

The most important regularities of processes of gas-phase oxidative functionalization of carbon nanotubes of the «Taunit»-series in nitric acid vapor and some properties of oxidized carbon nanotubes were studied. The possibility and conditions of scaling of this method in pilot production was shown.

COVALENT FUNCTIONALIZATION; OXIDATION; TAUNIT; CARBON NANOTUBES.

Ковалентная функционализация углеродных нанотрубок (УНТ) способствует появлению на их поверхности различных функциональных групп, благодаря которым проявляется химическое сродство УНТ к полимерным матрицам и повышается эффективность их применения в составе композиционных материалов [1]. В связи с ростом производства наномодифицированных полимерных материалов спрос на функционализированные формы углеродных нанотрубок в последние годы значительно возрос.

Чаще всего для введения в полярные полимерные матрицы (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые) используют УНТ, обработанные концентрированной азотной кислотой либо ее смесью (3:1) с концентрированной серной кислотой [2]. Показана эффективность окисления УНТ перекисью водорода и смесями на ее основе, перманганатом калия, персульфатами [3] и т. п. Однако описанные методы применимы преимущественно в лабораторных условиях, поскольку предполагают использование в высоких расходных нормах на единицу массы УНТ агрессивных и зачастую дорогостоящих реагентов. Значительно снизить количество окисляющих реагентов и частично решить проблему

утилизации отработанного сырья и продуктов реакции позволяет проведение процесса окисления углеродных нанотрубок в газовой фазе. В качестве окислителя в данном случае можно использовать кислород воздуха при повышенных температурах [4, 5], озон [6, 7] и его смесь с водяным паром [8]. Однако при этом количество сформировавшихся на поверхности УНТ кислородсодержащих функциональных групп, оцениваемое степенью функционализации (выражается в ммоль на 1 г УНТ), оказывается весьма незначительным ($\leq 0,3$ ммоль/г [4–8]). Более эффективно с этих позиций окисление в парах азотной кислоты, возможность которого показана в [9].

Цель настоящего исследования — изучение основных закономерностей газофазного окисления углеродных нанотрубок в парах азотной кислоты и оценка возможности опытно-промышленной реализации данного метода.

Лабораторная установка (рис. 1) состояла из вертикальной электрической печи 1 с расположенным внутри нее трубчатым двухкамерным реактором из кварцевого стекла. Верхняя камера с пористой керамической насадкой 2, снабженная патрубками для подачи жидкого окис-

лителя 3 и инертного газа 4, предназначалась для испарения окисляющего реагента.

В нижнюю камеру 5 помещались УНТ, в ней протекал основной процесс. При этом высота слоя УНТ обозначена как h . Поскольку окисляющий реагент подавался сверху, первыми в контакт с ним вступали УНТ, расположенные в верхней части слоя (его уровень обозначен как l). Нижняя камера заканчивалась патрубком 6 для выхода газообразных продуктов реакции (оксиды азота, углекислый газ) и паров непрореагировавшей азотной кислоты.

Использованы углеродные нанотрубки «Таунит-М» ($d = 8\text{--}15$ нм, $l \geq 2$ мкм; $S_{уд} = 300\text{--}320$ м²/г) производства ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов). Температуру процесса варьировали в интервале от 120 до 180 °С ($P = 1$ атм). При этих условиях концентрированная азотная кислота существует в виде паров, поэтому окисление является газофазным, как показано в [9].

Степень функционализации углеродных нанотрубок карбоксильными группами оценивалась титриметрически по методу Бозма [10].

Ранее показано [11], что при проведении процесса окисления исходных УНТ в парах концентрированной азотной кислоты («х.ч.», 65 масс. %) при 140 °С в данной установке средняя степень функционализации УНТ карбоксильными группами (S_f) в ходе процесса возрастает. Причем характер зависимости S_f от времени в значительной мере обусловлен величиной удельной поверхности и степенью дефектности углеродных нанотрубок. Так, для использованных в данной работе УНТ «Таунит-М», состоящих из 4–6 слоев углеродных атомов, характеризующихся достаточно высокой удельной поверхностью, степень функционализации во всем исследованном временном интервале растет и достигает при 10-часовом окислении 1,72 ммоль/г, как это видно из следующих данных [1]:

| Продолжительность τ , час, обработки парами азотной кислоты при 140 °С | Степень S_f функционализации СООН-группами УНТ «Таунит-М» |
|---|---|
| 2 | 0,40 |
| 5 | 0,88 |
| 7 | 1,32 |
| 10..... | 1,72 |

Это значение S_f оказывается значительно выше того, которое наблюдается при иных способах окисления. Так, при 10-часовом кипячении УНТ «Таунит-М» в концентрированной

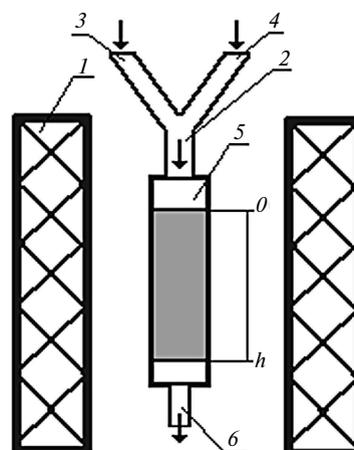


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования газофазной функционализации углеродных нанотрубок в парах азотной кислоты

азотной кислоте степень функционализации СООН-группами составляет 0,6 ммоль/г [12].

Продолжительная (более 5 часов) обработка УНТ в парах азотной кислоты способствует деструкции и полному (до СО₂) окислению материала, сопровождающемуся выраженной потерей массы. Однако ранее [11] после газофазного окисления УНТ извлекались из камеры реактора, тщательно перемешивались, и анализ степени функционализации проводился для усредненного материала.

В то же время взаимодействие углеродных нанотрубок с парами азотной кислоты в стационарном насыпном слое может протекать неравномерно, что необходимо учитывать при масштабировании процесса. Кроме того, примеси металлоксидных катализаторов, содержащиеся в полученных посредством CVD-процесса УНТ, могут оказать влияние и на протекание окисления.

В ходе последующих экспериментов оценивалась степень функционализации углеродных нанотрубок «Таунит-М», пробы которых отбирались из разных по высоте точек стационарного слоя. Окисление проводилось в течение 2 часов. При этом времени процесса деструктивные изменения поверхности УНТ еще не происходят, а степень функционализации усредненного материала достигает минимальных приемлемых для использования в составе полимерных композитов значений [12].

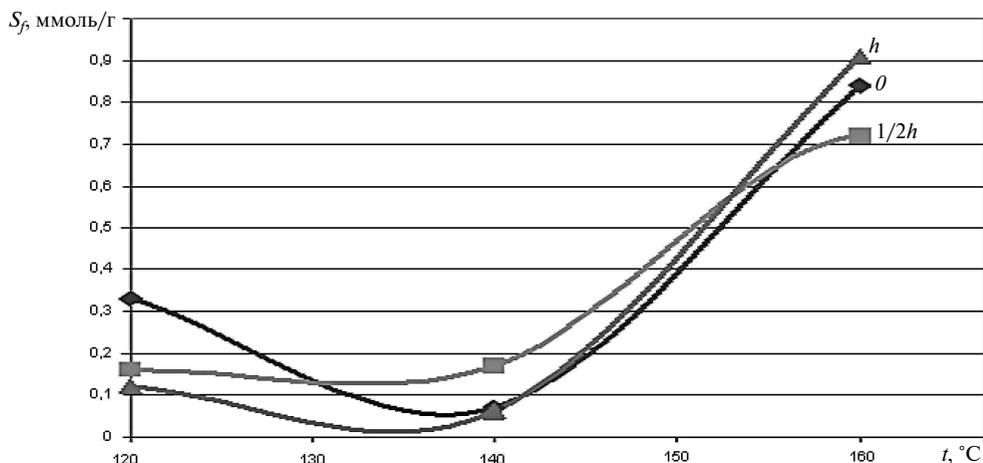


Рис. 2. Зависимость от температуры t степени S_f функционализации карбоксильными группами предварительно очищенных УНТ «Таунит-М» на различных по высоте уровнях стационарного слоя при 2-часовом окислении в парах азотной кислоты

Показано, что при взаимодействии предварительно очищенных от примесей катализатора углеродных нанотрубок с парами концентрированной азотной кислоты степень функционализации несколько возрастает с температурой (рис 2.). При 120 °C возможна конденсация паров азотной кислоты в верхней части стационарного слоя, в силу чего при данной температуре пробы УНТ из этой зоны характеризуются более высокой степенью функционализации. Этим же можно объяснить и выпадение начальной точки кривых (см. рис. 2) из общей возрастающей зависимости. При 160 °C S_f изменяется в пределах от 0,7 до 0,9 ммоль/г. Окисление в слое УНТ при этой температуре и при 140 °C протекает равномерно. Различия в значениях S_f образцов, отобранных из разных зон стационарного слоя, находятся в пределах ошибки эксперимента.

При окислении в парах азотной кислоты неочищенных УНТ максимальная степень функционализации достигает 1,2 ммоль/г в верхней части слоя УНТ (рис. 3). Однако по высоте стационарного слоя процесс протекает крайне неравномерно. Это можно объяснить тем, что остатки катализатора, в частности переходных металлов в парах азотной кислоты, могут образовывать нитраты, которые при температуре процесса тут же разлагаются и образуют нелетучие оксиды. Возможно из-за установления равновесия «нитрат переходного металла \leftrightarrow оксид переходного металла» частицы переходных ме-

таллов могут мигрировать по поверхности нанотрубок. В то же время известно, что они являются катализаторами процессов окисления [13]. Следовательно, за счет их присутствия и миграции по поверхности возможна пришивка карбоксильных групп не только на местах первоначальных дефектов. Протекание дополнительных, возможно, экзотермических реакций вызывает появление точек локального перегрева в слое УНТ, из-за чего окисление становится неравномерным.

Наименее интенсивно окисляются УНТ, находящиеся в середине стационарного слоя (1/2 h). В верхней и нижней частях этого слоя окисление более интенсивно, особенно при 160 и 180 °C, что, возможно, связано с меньшим разогревом этих зон и смещением равновесия в сторону окисленных форм. Согласно полученным данным при 140 °C процессы функционализации неочищенных УНТ в парах азотной кислоты протекают по всему слою относительно равномерно.

На основании проведенных экспериментов сделаны следующие выводы о возможной организации процесса газофазного окисления УНТ в парах азотной кислоты:

1. Двухчасовое окисление в парах азотной кислоты неочищенных УНТ позволяет достичь высоких значений S_f (до 1,2 ммоль/г). Но лишь при оптимальной температуре (140 °C) процесс в стационарном слое протекает равномерно. При

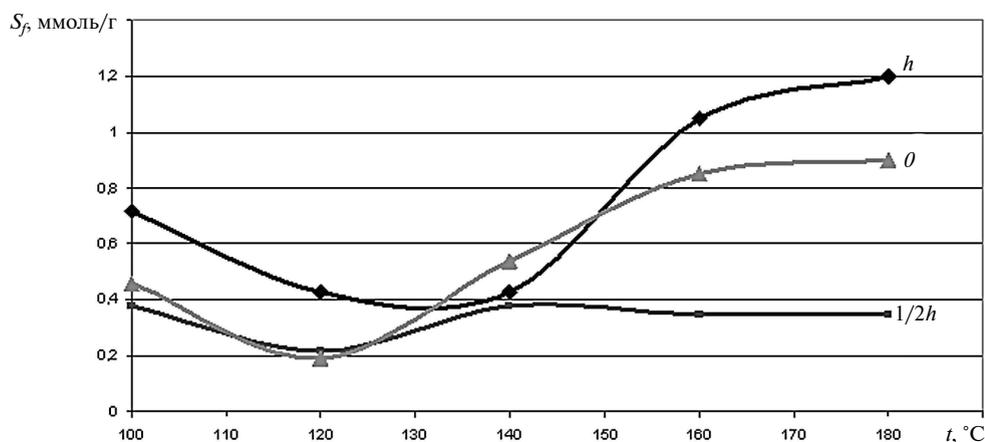


Рис. 3. Зависимость от температуры t степени S_f функционализации карбоксильными группами неочищенных УНТ «Таунит-М» на различных по высоте уровнях стационарного слоя при 2-часовом окислении в парах азотной кислоты

более высоких температурах реализация метода возможна при иных условиях. Для обеспечения равномерности протекания процесса, ликвидации зон локального перегрева и застоя слой УНТ необходимо сделать подвижным. Это возможно в аппаратах с псевдо- или виброожиженным слоем УНТ.

2. Газофазная обработка УНТ в парах азотной кислоты, очищенных от примесей металлоксидных катализаторов, возможна в стационарном насыпном слое во всем исследованном интервале температур. Однако при этом достигается более низкая степень функционализации продуктов, чем при окислении неочищенных УНТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sahoo N.G., Rana S., Cho J.W., Li L., Chan S.-H. Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes. *Progress in Polymer Science*. 2010. P. 837–867.
2. Rosca I.D., Watari F., Uo M., Akasaka T. Oxidation of multiwalled carbon nanotubes by nitric acid. *Carbon*. 2005. Vol. 43. P. 3124–3131.
3. Datsyuk V., Kalyva M., Papagelis K., Parthenios J., Tasis D., Siokou A., Kallitsis I., Galiotis C. Chemical oxidation of multiwalled carbon nanotubes. *Carbon*. 2008. Vol. 46. P. 833–840.
4. Ajayan P.M., Ebbesen T.W., Ichihashi T., Iijima S., Tanigaki K., Hiura H. Opening carbon nanotubes with oxygen and implications for filling. *Nature*. 1993. P. 522–555.
5. Yao V., Lordi S.X.C., Ma E., Dujardin A., Krishnan M.M.J., Ebbesen T. [et al.] Structure and oxidation patterns of carbon nanotubes. *J. Mater. Res*. 1998. Vol. 13. P. 2432–2437.
6. Cataldo F. A Study on the Action of Ozone on Multiwall Carbon Nanotubes. *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*. 2008. Vol. 16. P. 1–17.
7. Naeimi H., Mohajeri A., Moradi L., Rashidi A.M. Efficient and facile one pot carboxylation of multiwalled carbon nanotubes by using oxidation with ozone under mild conditions. *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 256. P. 631–635.
8. Peng K., Liu L.-Q., Li H., Meyer H., Zhang Z. Room temperature functionalization of carbon nanotubes using an ozone/water vapor mixture. *Carbon*. 2011. Vol. 49. P. 70–76.
9. Xia W., Jin C., Kundu S., Muhler M. A highly efficient gas-phase route for the oxygen functionalization of carbon nanotubes based on nitric acid vapor. *Carbon*. 2009. Vol. 47. P. 919–922.
10. Boehm H.P. Surface oxides on carbon and their analysis: a critical Assessment. *Carbon*. 2002. Vol. 40. P. 145–149.
11. Горский С.Ю., Дьячкова Т. П., Ткачев А.Г. Шуклинов А. Исследование газофазного окисления углеродных нанотрубок. *Научное обозрение*. 2012. №6. С. 173–176.
12. Dyachkova T.P., Melezhyk A.V., Gorsky S.Yu., Anosova I.V., Tkachev A.G. Some aspects of functionalization and modification of carbon nanomaterials. *Nanosystems: Physics, Chemistry, mathematics*. 2013. Vol. 4, №5. P. 605–621.
13. Jeong H.J., Kim K.K., Jeong S.Y. [et al.] High yield catalytic synthesis of thin multiwalled carbon nanotubes. *J. Phys. Chem. B*. 2004. Vol. 108, № 46. P. 17695–17698.

REFERENCES

1. Sahoo N.G., Rana S., Cho J.W., Li L., Chan S.-H. Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes. *Progress in Polymer Science*. 2010. P. 837–867.
2. Rosca I.D., Watari F., Uo M., Akasaka T. Oxidation of multiwalled carbon nanotubes by nitric acid. *Carbon*. 2005. Vol. 43. P. 3124–3131.
3. Datsyuk V., Kalyva M., Papagelis K., Parthenios J., Tasis D., Siokou A., Kallitsis I., Galiotis C. Chemical oxidation of multiwalled carbon nanotubes. *Carbon*. 2008. Vol. 46. P. 833–840.
4. Ajayan P.M., Ebbesen T.W., Ichihashi T., Iijima S., Tanigaki K., Hiura H. Opening carbon nanotubes with oxygen and implications for filling. *Nature*. 1993. P. 522–555.
5. Yao V., Lordi S.X.C., Ma E., Dujardin A., Krishnan M.M.J., Ebbesen T. [et al.] Structure and oxidation patterns of carbon nanotubes. *J. Mater. Res*. 1998. Vol. 13. P. 2432–2437.
6. Cataldo F. A Study on the Action of Ozone on Multiwall Carbon Nanotubes. *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*. 2008. Vol. 16. P. 1–17.
7. Naeimi H., Mohajeri A., Moradi L., Rashidi A.M. Efficient and facile one pot carboxylation of multiwalled carbon nanotubes by using oxidation with ozone under mild conditions. *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 256. P. 631–635.
8. Peng K., Liu L.-Q., Li H., Meyer H., Zhang Z. Room temperature functionalization of carbon nanotubes using an ozone/water vapor mixture. *Carbon*. 2011. Vol. 49. P. 70–76.
9. Xia W., Jin C., Kundu S., Muhler M. A highly efficient gas-phase route for the oxygen functionalization of carbon nanotubes based on nitric acid vapor. *Carbon*. 2009. Vol. 47. P. 919–922.
10. Boehm H.P. Surface oxides on carbon and their analysis: a critical Assessment. *Carbon*. 2002. Vol. 40. P. 145–149.
11. Gorskiy S.Yu., Dyachkova T.P., Tkachev A.G. Shuklinov A. Issledovaniye gazofaznogo okisleniya uglerodnykh nanotrubok. *Nauchnoye obozreniye*. 2012. №6. S. 173–176;
12. Dyachkova T.P., Melezhyk A.V., Gorsky S.Yu., Anosova I.V., Tkachev A.G. Some aspects of functionalization and modification of carbon nanomaterials. *Nanosystems: Physics, Chemistry, mathematics*. 2013. Vol. 4. №5. P. 605–621.
13. Jeong H.J., Kim K.K., Jeong S.Y. [et al.]. Highyield catalytic synthesis of thin multiwalled carbon nanotubes. *J. Phys. Chem. B*. 2004. Vol. 108, № 46. P. 17695–17698.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОРСКИЙ Сергей Юрьевич — аспирант ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»; 392000, ул. Ленинградская, 1, Тамбов, Россия; e-mail: eshik_88@mail.ru

ДЬЯЧКОВА Татьяна Петровна — кандидат химических наук; Тамбовский государственный технический университет; 392000, ул. Ленинградская, 1, Тамбов, Россия; e-mail: mashtatpetr@mail.ru

БУРАКОВА Елена Анатольевна — кандидат технических наук; Тамбовский государственный технический университет; 392000, ул. Ленинградская, 1, Тамбов, Россия; e-mail: nanotam@yandex.ru

AUTHORS

GORSKY Sergey Y. — Tambov State Technical University; 1, Leningradskaya st., Tambov, 392000, Russia; e-mail: eshik_88@mail.ru

DYACHKOVA Tatyana P. — Tambov State Technical University; 1, Leningradskaya st., Tambov, 392000, Russia; e-mail: mashtatpetr@mail.ru

BURAKOVA Elena A. — Tambov State Technical University; 1, Leningradskaya st., Tambov, 392000, Russia; e-mail: mashtatpetr@mail.ru



УДК 621.77

*Н.Г. Колбасников, Ю.А. Безобразов***ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРАВКИ ГОТОВОГО ПРОКАТА
НА КОНЕЧНЫЕ СВОЙСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА***N.G. Kolbasnikov, Yu.A. Bezobrazov***FINISHED ROLLED STRETCHING TEMPERATURE EFFECT
ON MECHANICAL PROPERTIES FORMATION
OF LARGE DIAMETER PIPES**

Представлены результаты физического моделирования с применением комплекса Gleeble-3800 отдельных стадий изготовления труб большого диаметра и исследовано их влияние на конечные свойства материала трубы. Методом «растяжение—сжатие» исследовано влияние правки листа, формовки трубы, экспандирования и термического цикла нанесения полимерного покрытия на прочностные и пластические свойства.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА; МИКРОЛЕГИРОВАННЫЕ ТРУБНЫЕ СТАЛИ; КОМПЬЮТЕРНОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ГОРЯЧАЯ ПРОКАТКА.

The physical simulation results on Gleeble-3800 of the individual stages production of large diameter pipes are presented and the effect of these stages on the final properties of the pipe material was investigated. Using «tension-compression» method for the physical simulation on Gleeble-3800 the stretching temperature effect on mechanical properties formation of large diameter pipes was investigated at each stage pipes redivision: molding, expansion and polymer coating thermal cycle.

THERMOMECHANICAL PROCESSING; MICROALLOYED PIPELINE STEELS; COMPUTER AND PHYSICAL SIMULATION; HOT ROLLING.

Производство сталей с заданными уровнем механических свойств и параметрами структуры — одна из основных задач металлургического производства. Эта задача стоит и при производстве труб большого диаметра из современных марок микролегированных сталей. Известно, что на свойства горячекатаного металла влияют практически все технологические факторы, начиная от исходной структуры литой заготовки и заканчивая условиями охлаждения готового проката, причем наиболее заметное влияние оказывают термомеханические параметры чистовой прокатки и ускоренного контролируемого охлаждения. Между тем принято считать, что режимы правки листа в силу небольших величин пластической деформации не оказывают заметного влияния на свойства штрипса. Очевидно, именно этот факт послужил причиной того, что режимы правки не учитываются при регламентировании технологических параметров, отвечающих за формиро-

вание свойств горячекатаной стали. Трубный передел оказывает заметное влияние на механические свойства основного металла труб, особенно на предел текучести. Это связано с тем, что при холодной формовке, экспандировании, нанесении полимерного покрытия и испытаниях механических свойств на разогнутой пробе в металле происходит знакопеременная пластическая деформация, приводящая к изменению предела текучести вследствие проявления эффекта Баушингера [1–4]. Для целенаправленной корректировки технологии изготовления трубных сталей и труб необходимо получить представления о вкладе каждой из технологических операций в формирование конечных свойств трубы. Для достижения этой цели было поставлено исследование, которое состояло в воспроизведении процессов контролируемой прокатки толстого листа, правки (прокатный передел), формовки, экспандирования и нанесения полимерного по-

крытия (трубный передел) на одном образце. При реализации подобного эксперимента обработку образца можно в любой момент остановить, исследовать структуру и свойства металла и определить тем самым вклад каждой из операций в конечные свойства готовой трубы. Для имитации технологии изготовления толстого листа из трубной стали, формовки и экспандирования труб использовали разработанную ранее методику «растяжение — сжатие» [5–10] на модуле Pocket Jaw термомеханического комплекса Gleeble-3800.

Методика проведения эксперимента. Для исследований были разработаны специальные захваты для комплекса Gleeble и образцы, представленные на рис. 1. Рабочая часть этих образцов не теряет устойчивости пластической деформации при многократных циклах «растяжение — сжатие», что позволяет выполнить физическое моделирование всего цикла изготовления трубы.

К середине рабочей части образцов приваривали термопару и в этом же сечении закрепляли высокоточный измеритель поперечной деформации. Эти же образцы использовали после дополнительной обработки для тестирования механических свойств и исследования структуры. Испытания по определению механических свойств выполняли также на комплексе Gleeble. Исследования были проведены на микролегированной трубной стали категории прочности X80.

Физическое моделирование контролируемой прокатки на стане 5000, правки, формовки, экспандирования и термического цикла нанесения полимерного покрытия. Технологический цикл горячей прокатки толстого листа для труб большого диаметра состоит из нескольких стадий.

Металл нагревают до температуры 1150–1220 °С, выдерживают при этой температуре для достижения структурного состояния гомогенного твердого раствора. После выдачи из печи струей водовоздушной смеси сбивают печную окалину и подают металл к прокатному стану. Прокатку начинают при температуре поверхностного слоя исходной непрерывно-литой заготовки 1000–1050 °С, в то время как среднемассовая температура металла по расчетным данным составляет приблизительно 1100–1150 °С. Черновая прокатка включает 7–12 проходов, после чего толщина раската составляет 90–120 мм. После черновой прокатки металл охлаждается на рольганге до температуры начала чистовой прокатки, которая составляет 780–850 °С. Чистовую прокатку проводят за 10–15 проходов до заданных размеров готового листа, после чего от температур 690–710 °С металл охлаждают со скоростью 15–20 °С/с до температуры 550–600 °С. После прокатки лист правят на правильной машине и охлаждают до комнатной температуры. В ряде случаев правку выполняют повторно при комнатной температуре.

Трубный передел состоит в формовке листа в трубу на прессе пошаговой формовки, экспандировании трубы для придания требуемого размера и формы. Окончательной операцией является нанесение наружного и внутреннего «гладкостных» полимерных покрытий. Для нанесения покрытий после ряда подготовительных операций трубу нагревают до температуры приблизительно 200 °С и выдерживают около 20 минут.

Схема физического эксперимента по моделированию контролируемой прокатки представлена на рис. 2. Образцы нагревали до температуры

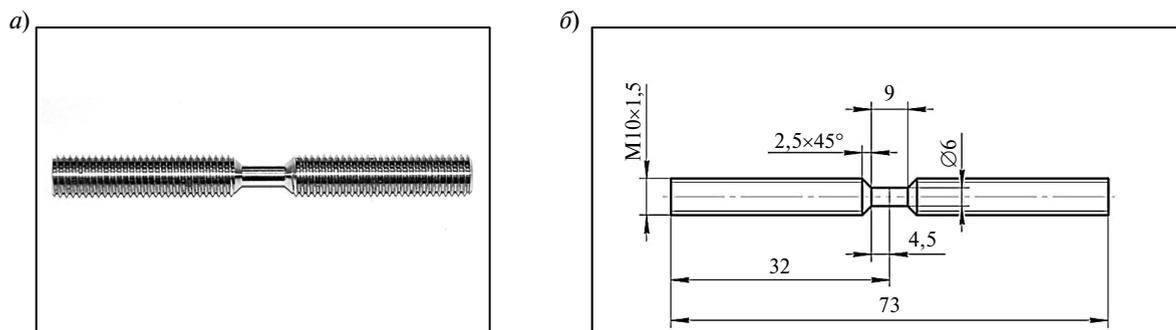


Рис. 1. Вид (а) и размеры образца для испытаний (б) с использованием методики «растяжение — сжатие»

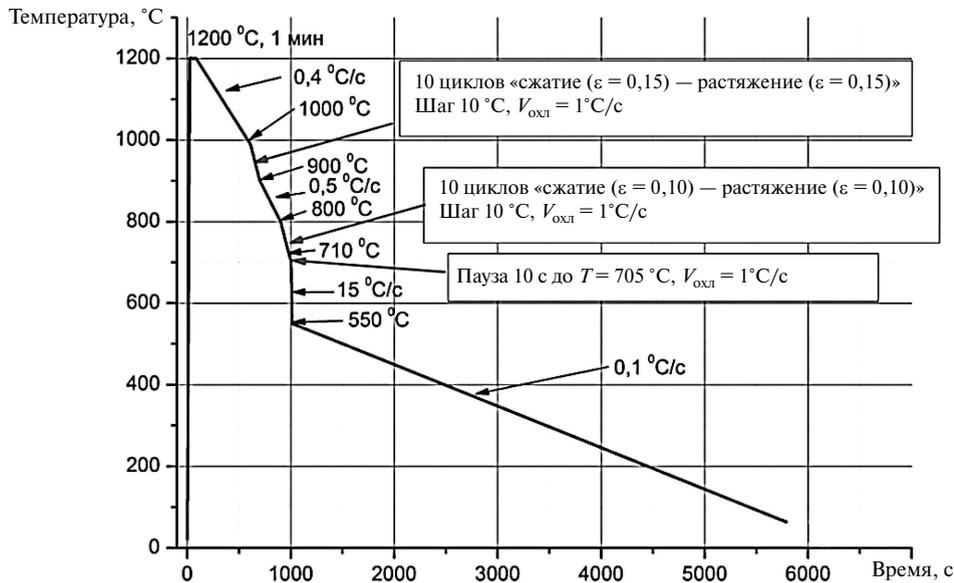


Рис. 2. Схема физического моделирования контролируемой прокатки

1200 °C со скоростью 5 °C/c, выдерживали 1 мин для аустенизации, затем охлаждали со скоростью 0,4 °C/c до температуры 1000 °C.

При моделировании черновой прокатки металл деформировали 10 раз растяжением — сжатием с истинной степенью деформации $\varepsilon = \varepsilon_{\text{раст}} + \varepsilon_{\text{сж}} = 0,15 + 0,15 = 0,3$ со скоростью 1 с⁻¹ через каждые 10 °C. Таким образом, стадия черновой прокатки была завершена при 900 °C, после чего металл охлаждали со скоростью 0,5 °C/c до температуры начала чистой прокатки, равной 800 °C. Пауза при подстуживании металла составила 200 секунд.

При моделировании чистой прокатки и ускоренного контролируемого охлаждения (УКО) выполняли десять деформаций растяжением — сжатием со степенью деформации 10 % на каждом этапе. Температура окончания чистой прокатки составила 710 °C, по достижении которой металл охлаждали до температуры 705 °C со скоростью 0,5 °C/c, а затем охлаждали со скоростью 15 °C/c до температуры 550 °C. До температуры правки металл охлаждали со скоростью 0,1 °C/c. Образцы, обработанные по режиму, представленному на рис. 3, имели следующие свойства: $\sigma_T = 640$ МПа; $\sigma_B = 890$ МПа; $\sigma_T/\sigma_B = 0,72$; $\psi = 80$ %. Относительное удлинение не измеряли, поскольку геометрические размеры образца позволяли использовать только датчик

поперечной деформации. После физического моделирования контролируемой прокатки на Gleeble на полученных образцах было исследовано:

влияние температуры правки на изменение свойств штрипса;

влияние деформаций при формовке и экспандировании на свойства трубного полуфабриката;

влияние термического цикла при нанесении полимерных покрытий на конечные свойства материала трубы.

Моделирование правки. Правка готового проката на роликовой правильной машине показана на рис. 3. Она представляет собой изгибные деформации полосы между роликами по затухающей синусоиде, в результате чего прокат приобретает плоскую форму, а возможные искривления устраняются. После остывания до комнатной

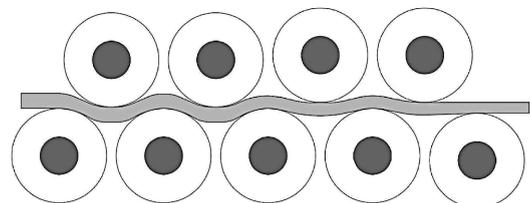


Рис. 3. Схема правки в роликовой правильной машине

температуры прокатанный лист может вновь приобрести искривленную форму из-за неравномерности температур листа при правке. В этом случае металл подвергают повторной правке.

Таким образом, температура правки может составлять от 550 до 20 °С. Физическое моделирование правки полосы выполнено при помощи последовательных деформаций растяжением и сжатием по режиму, близкому к реальным технологическим параметрам правки толстого листа на 9-тироликовой машине, который представлен в таблице. Температуру знакопеременной деформации (имитация правки) изменяли от 20 до 500 °С.

Режим правки полосы, моделируемый на Gleeble-3800

| Номер цикла | Истинная деформация, % | |
|-------------|------------------------|--------|
| | Растяжение | Сжатие |
| 1 | 1,2 | 1,2 |
| 2 | 0,5 | 0,5 |
| 3 | 0,2 | 0,2 |

Изменение предела текучести стального листа после правки по указанному режиму в зависимости от температуры правки представлено на рис. 4. Видно, что температура правки металла после контролируемой прокатки существенно влияет на предел текучести металла.

Понижение предела текучести после правки (см. рис. 4) при температурах 20–300 °С по сравнению с горячекатаным состоянием обусловлено, как принято считать, проявлением эффекта Ба-

ушингера, так как последней деформацией при правке была деформация сжатия. Подобный эффект может быть объяснен генерацией свободных дислокаций при малых деформациях во время правки, которые при смене знака нагружения движутся в обратную сторону при меньшем напряжении; повышение σ_1 после правки при 400 °С вызвано, очевидно, фиксацией генерированных при правке дислокаций внедренными атомами углерода — эффект, аналогичный печному упрочнению (*bake hardening*), используемому для упрочнения автомобильных сталей при сушке лакокрасочного покрытия. При этом закрепленные атомами углерода дислокации при смене знака нагружения являются барьерами для вновь образующихся и движущихся дислокаций, создавая тем самым дополнительное упрочнение.

Моделирование формовки, экспандирования и термического цикла нанесения полимерного покрытия. При пошаговой *формовке* труб большого диаметра происходит изгиб по всей длине листа. Изгибные деформации неоднородны по сечению, их максимум сосредоточен в приповерхностных слоях металла. Для прямошовных труб степень деформации внешних слоев может быть грубо оценена как отношение толщины стенки к диаметру — t/D . Для труб размером 1420×(22–30) мм это отношение составляет 1,5–2,1 %. При моделировании формовки на комплексе Gleeble часть образцов подвергали дополнительному растяжению со степенью деформации 2 % (имитация деформации наружного слоя), а другую

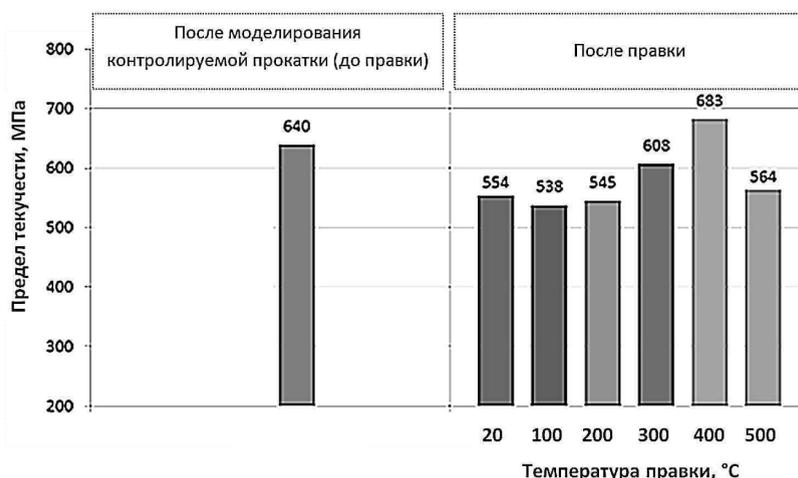


Рис. 4. Изменение предела текучести стали при 20 °С после правки при различных температурах

часть — сжатию со степенью деформации 2 % (для имитации поведения внутренних слоев).

После формовки и сварки трубы происходит ее *экспандирование* — раздача трубы по диаметру для выравнивания формы и частичного снятия сварочных напряжений. Металл при этом подвергается тангенциальным растягивающим деформациям (степень деформации 0,8 %, скорость $0,005 \text{ с}^{-1}$). Именно эти режимы обработки были реализованы на образцах после моделирования формовки. Поскольку при формовке листа и экспандировании по сечению трубы возникают различные виды напряженно-деформированного состояния, внешние и внутренние слои материала приобретают отличные друг от друга механические свойства. Рис. 5 демонстрирует изменение

свойств стали при формовке и экспандировании (суммарный эффект) для образцов, прокатанных по одному режиму, но правленных при разных температурах. На рис. 5 также отражены свойства образцов после моделирования горячей прокатки и правки, чтобы сравнить со свойствами материала трубы. Представленные механические свойства получены в результате испытаний на растяжение на модуле Pocket Jaw комплекса Gleeble 3800 (скорость деформации $d\varepsilon/dt = 0,01 \text{ с}^{-1}$).

По рис. 5 видно, как изменяются механические свойства трубы после трубного передела из листа:

предел текучести возрастает в среднем на 170 МПа для внешних слоев трубы и на 90 МПа для внутренних;

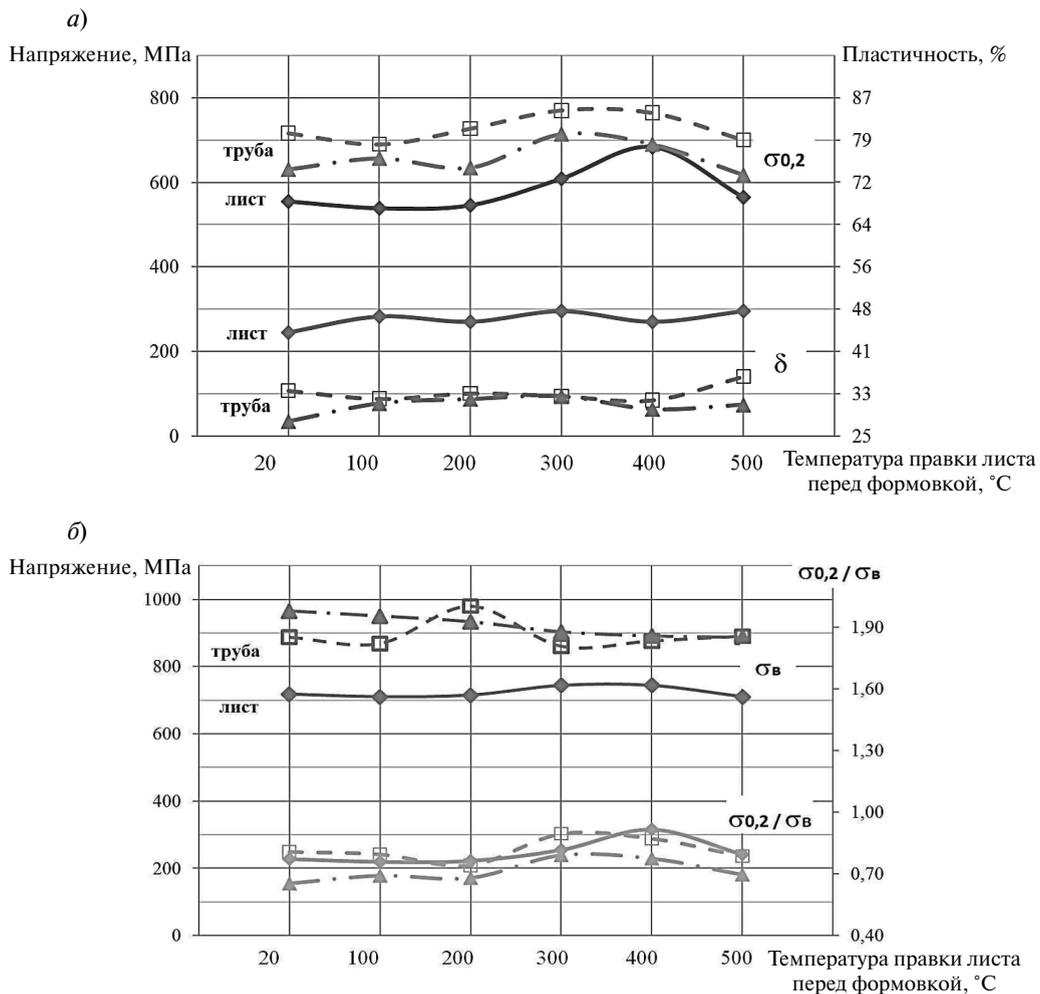


Рис. 5. Изменения предела текучести и сужения в шейке (а), предела прочности и отношения σ_T/σ_B (б) после моделирования формовки и экспандирования в зависимости от температуры правки листа после прокатки (— лист; - - - - внешние слои трубы; — · — · — внутренние слои трубы)

предел прочности повышается в среднем на 200 МПа для внешних слоев трубы и на 230 МПа для внутренних;

пластичность падает в среднем на 16 % для внешних слоев трубы и на 19 % для внутренних;

отношение предела текучести к пределу прочности возрастает в среднем на 0,02 единиц для внешних слоев трубы и снижается на 0,11 единиц для внутренних.

Физическое моделирование *термического цикла нанесения покрытий* проводили после имитации формовки и экспандирования на тех же образцах. Образцы нагревали до температуры 225 °С со скоростью 1 °С/с, выдерживали 20 мин и охлаждали до комнатной температуры со скоростью 1 °С/с.

На рис. 6 представлены зависимости от температуры правки металла после контролируемой прокатки свойств исследуемой стали по стадиям передела.

На рис. 6 для стадий «изготовление трубы» и «нанесение покрытий на трубу» приведены средние арифметические значения механических свойств по толщине стенки трубы, т. е. среднее арифметическое свойств внешних

и внутренних слоев трубы. По графикам видно, что все последовательные стадии изготовления штрипса и трубы влияют на ее конечные свойства. Особенно заметно влияние правки горячекатаного листа, которая в зависимости от температуры может вызывать либо понижение, либо повышение прочностных свойств при неизменных параметрах других процессов изготовления листа и трубы. Каждая из стадий передела вносит свой вклад в формирование конечных свойств металла трубы.

Анализ данных, представленных на рис. 6, позволяет сформулировать следующие выводы:

Правка при всех температурах от 20 до 500 °С может снижать предел прочности на 200 МПа и предел текучести горячекатаного штрипса на 100 МПа.

Последующие операции формовки и экспандирования в совокупности способствуют повышению предела прочности и предела текучести до уровня свойств исходного штрипса.

Дальнейшая операция нанесения полимерного покрытия может повышать предел текучести на 80 МПа и не существенно влияет на предел прочности при всех температурах правки.

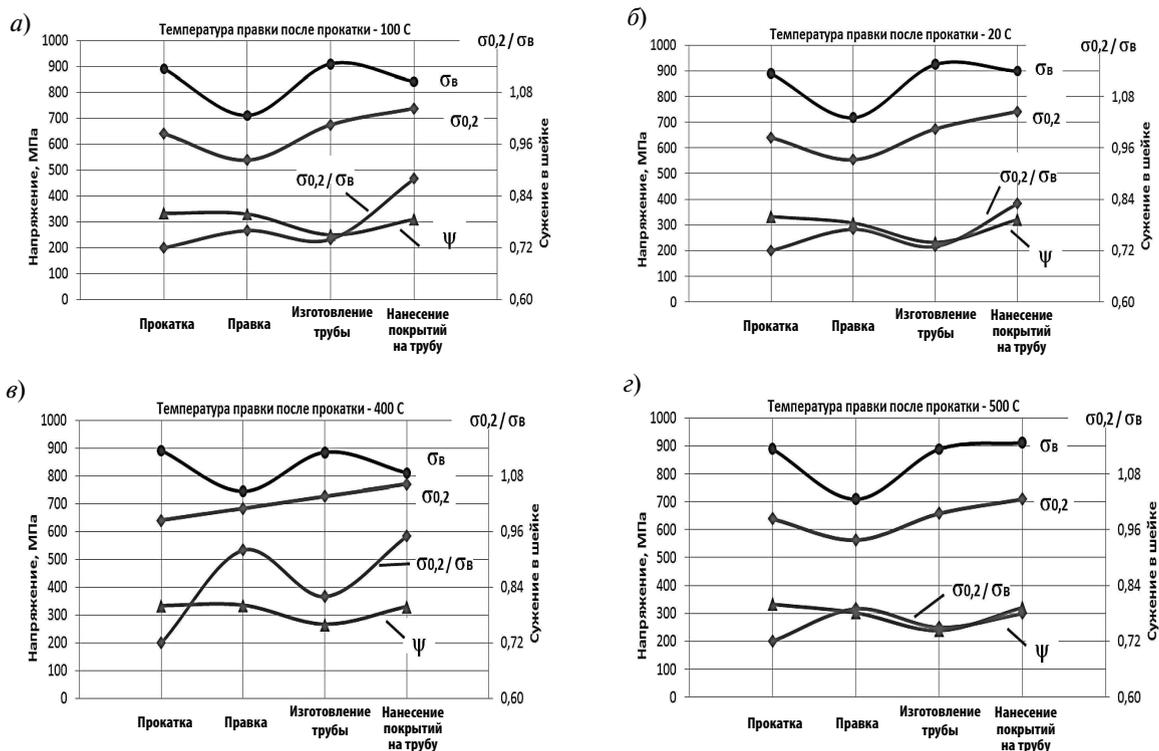


Рис. 6. Свойства металла по стадиям передела при изготовлении трубы для различных температур правки после контролируемой прокатки: а — 20 °С; б — 100 °С; в — 400 °С; з — 500 °С

Относительное сужение в шейке, являющееся характеристикой пластических свойств, практически не зависит от режима правки и снижается лишь при формовке и экспандировании, а после термического цикла нанесения полимерного покрытия повышается до уровня исходного горячекатаного штрипса.

Термический цикл нанесения полимерных покрытий на трубу вызывает повышение предела текучести стали на 75–80 МПа. Это, очевидно, связано с закреплением подвижных дислокаций, генерированных при формовке и экспандировании трубы, внедренными атомами углерода.

Разработанная методика «растяжение — сжатие» для физического моделирования на

комплексе Gleeble-3800 и использование специальных образцов, сохраняющих устойчивость пластической деформации на протяжении многих циклов деформации растяжением — сжатием, позволили выполнить имитацию всего цикла производства труб большого диаметра, включая операции контролируемой прокатки, ускоренного охлаждения, правки, формовки трубы, экспандирования и термический цикл нанесения полимерного покрытия. Таким образом, открывается возможность физического моделирования технологий многостадийных процессов горячей деформации, например контролируемой прокатки толстого листа, что позволяет определить вклад каждой стадии обработки металла в формирование конечной структуры и механических свойств металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kostrzyhev A.G., Strangwood M.** Bauschinger Effect in Microalloyed Steels: Part I. Dependence on Dislocation-Particle Interaction // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010. Vol. 41, № 6.
2. **Han K., Van Tyne C.J.** Effect of Strain and Strain Rate on the Bauschinger Effect Response of Three Different Steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005. Vol. 36, № 9.
3. **Ralnepuli R.C., Cortes C.O.S.** A method of calculating Bauschinger effect in API linepipe steels // *Mech. and Steel Processing. 28th Mech. Working and Steel Processing. Conf. of Iron and Steel Society, AIME*. 1987. Vol. 24.
4. **Li Zhonghua, Gu Haicheng.** Bauschinger effect and residual phase stresses in two ductile-phase steels: Part I. The influence of phase stresses on the Bauschinger effect // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1990. Vol. 21, № 2.
5. **Bezobrazov Y.A., Kolbasnikov N.G., Naumov A.A.** High Strength Dual-Phase Steel Structure Evolution During Hot Rolling // *Materials Science & Technology.— 2012 Conference & Exhibition (MS&T'12), Thermal and Thermomechanical Processing Session.— Pittsburgh, PA, USA.— P. 1054–1061.*
6. **Naumov A.A., Bezobrazov Y.A., Kolbasnikov N.G., Chernikov E.V.** Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing // *Materials Science Forum.— 2013. Vol. 762.— P. 62–69.*
7. **Колбасников Н.Г., Безобразов Ю.А., Наумов А.А.** Эволюция структуры высокопрочной двухфазной стали при горячей прокатке // *Сталь*. №7. 2013. С. 73–79.
8. **Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Мартяшов И.С., Сулягин Р.В.** Исследование эффекта Баушингера, физическое моделирование формирования свойств микролегированной стали в процессе изготовления труб // *Сталь*. 2012. №8. С. 56.
9. **Васильев А.А., Соколов Д.Ф., Колбасников Н.Г., Соколов С.Ф., Немтинов А.А.** Моделирование микроструктуры и механических свойств стального листа после прокатки на стане 2000 ОАО «Северсталь» // *Вопросы материаловедения*. 2010. №3 (63). С. 16–27.
10. **Безобразов Ю.А., Колбасников Н.Г., Наумов А.А.** Подтверждение методики растяжение-сжатие для физического моделирования процессов многостадийной пластической деформации металлов // *Сб. трудов: СММТ 2013. Санкт-Петербург, 2013. С. 305–307.*

REFERENCES

1. **Kostrzyhev A.G., Strangwood M.** Bauschinger Effect in Microalloyed Steels: Part I. Dependence on Dislocation-Particle Interaction. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010. Vol. 41, № 6.
2. **Han K., Van Tyne C.J.** Effect of Strain and Strain Rate on the Bauschinger Effect Response of Three Different Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005. Vol. 36, № 9.
3. **Ralnepuli R.C., Cortes S.O.S.** A method of calculating Bauschinger effect in API linepipe steels. *Mech. and Steel Processing. 28th Mech. Working and Steel Processing. Conf. of Iron and Steel Society, AIME*. 1987. Vol. 24.

4. **Li Zhonghua, Gu Haicheng.** Bauschinger effect and residual phase stresses in two ductile-phase steels: Part I. The influence of phase stresses on the Bauschinger effect. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1990. Vol. 21, № 2.

5. **Bezobrazov Y.A., Kolbasnikov N.G., Naumov A.A.** High Strength Dual-Phase Steel Structure Evolution During Hot Rolling. *Materials Science & Technology Conference & Exhibition (MS&T'12), Thermal and Thermomechanical Processing Session*.— Pittsburgh, PA, USA. P. 1054–1061.

6. **Naumov A.A., Bezobrazov Y.A., Kolbasnikov N.G., Chernikov E.V.** Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing. *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 762. P. 62–69.

7. **Kolbasnikov N.G., Bezobrazov Yu.A., Naumov A.A.**

Evolutsiia struktury vysokoprochnoi dvukhfaznoi stali pri goriachei prokatke. *Stal'*. 2013. №7. S. 73–79. (rus.)

8. **Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Martiashov I.S., Suliagin R.V.** Issledovanie effekta Baushingera, fizicheskoe modelirovanie formirovaniia svoystv mikrolegirovannoi stali v protsesse izgotovleniia trub. *Stal'*. 2012. №8. S. 56. (rus.)

9. **Vasil'ev A.A., Sokolov D.F., Kolbasnikov N.G., Sokolov S.F., Nemtinov A.A.** Modelirovanie mikrostruktury i mekhanicheskikh svoystv stal'nogo lista posle prokatki na stane 2000 OAO «Severstal'». *Voprosy materialovedeniia*. 2010. №3 (63). S. 16–27. (rus.)

10. **Bezobrazov Yu.A., Kolbasnikov N.G., Naumov A.A.** Podtverzhdenie metodiki rastiazhenie-szhatie dlia fizicheskogo modelirovaniia protsessov mnogostadiinnoi plasticheskoi deformatsii metallov. *Sb. trudov: SMMT* 2013. Sankt-Peterburg, 2013. S. 305–307. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЗОБРАЗОВ Юрий Алексеевич — аспирант кафедры пластической обработки металлов ИММиТ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nw86master@mail.ru

КОЛБАСНИКОВ Николай Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры пластической обработки металлов института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com

AUTHORS

BEZOBRAZOV Yuriy A. — postgraduate, Metal Processing Department, IMM&T, Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nw86master@mail.ru

KOLBASNIKOV Nikolay G. — Doctor of Technical Sciences, Metal Processing Department, IMM&T, Professor; Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com



УДК 620.22:669.17(075.8)

Е.И. Пряхин, Д.М. Шарпова

К ВОПРОСУ О ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАГРЕВАХ

E.I. Pryahin, D.M. Sharapova

ABOUT DETERIORATION OF PROPERTIES OF LOW-ALLOYED STRUCTURAL STEELS AT SHORT-TERM HEATING PROCEDURES

Установлена взаимосвязь между наблюдаемыми низкими значениями работы удара и особенностями формирования структуры в зоне термического влияния (ЗТВ) при сварке под флюсом труб из низколегированных сталей X80, X90, K70 (появление хрупких выделений с повышенным содержанием основных легирующих элементов на границах крупных зерен). Показано, что при термических циклах с максимальными температурами нагрева $900\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} \leq 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростью охлаждения $\omega_{8/5} = \text{const}$ (в интервале $800\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$) увеличивается устойчивость аустенита по мере снижения T_{max} и происходит понижение медианы температурного интервала начала и конца превращения аустенита с увеличением скорости охлаждения.

НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ; ТЕРМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; СТРУКТУРА; СВОЙСТВА; ТРУБЫ; СВАРКА; ЗТВ.

The interrelation was established between the observed low values of impact energy and features of structure formation in HAZ in submerged arc welding of pipes of low-alloy steels X80, X90, K70 (occurrence of brittle precipitates with high content of the main alloying elements on the boundaries of large grains). It is shown that for thermal cycles with maximum heating temperatures $900\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} \leq 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ and cooling rate $\omega_{8/5} = \text{const}$ (in the range of $800\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$) stability of austenite increases with decreasing T_{max} and the median of the temperature interval between the beginning and the end of the austenite transformation decreases with increasing cooling rate.

LOW-ALLOY STEELS; THERMAL CYCLE; MODELING; STRUCTURE; PROPERTIES; PIPES; WELDING; HAZ.

Потребность нефтегазовой промышленности в огромном количестве труб интенсифицировала разработки высокопрочных низколегированных сталей, технологий, оборудования и сварочных материалов для изготовления труб. В частности, специализированные трубосварочные станы для автоматической двухпроходной многодуговой (до 5 электродов в одну ванну) сварки под флюсом продольных швов труб позволяют при использовании современных сварочных материалов реализовать технологические процессы сварки на высоких скоростях и больших погонных энергиях [1–5].

Известно, что в пределах зоны термического влияния формируется ряд структур, перманентно

изменяющихся в направлении температурного градиента от шва до структуры основного металла [6–8]. Причем, если сварщики умеют управлять и контролировать структуру и свойства металла шва, в том числе путем разработки и применения специальных сварочных материалов и технологических приемов, то применительно к металлу ЗТВ (зоны термического влияния) их возможности ограничиваются контролем над температурной обстановкой (термический цикл). Учитывая, что чувствительность основного металла к кратковременным нагревам определяет свариваемость материала, вопрос деградации свойств основного материала в ЗТВ по мере развития технологий сварки под флюсом в направлении



Рис. 1. Сварное соединение трубы при двух проходной многодуговой сварке

повышения погонных энергий сохраняет свою актуальность. Настоящая работа является продолжением исследований и обобщением результатов ранее представленных в [9–11].

Анализ структур ЗТВ реальных сварных соединений труб различных производителей позволил выявить некоторые особенности, а именно: в ЗТВ при сварке 2-го наружного прохода после 1-го внутреннего (рис. 1) наблюдаются выделения в виде сплошных окантовок зерен, которые по мере приближения к зоне сплавления постепенно исчезают (рис. 2).

Следует отметить, что при однократной сварке такие выделения в структуре ЗТВ отсутствуют. Испытания образцов, вырезанных из сварных соединений труб по ЗТВ, на ударный изгиб при температурах от -30 до -60 °C показали, что отдельные результаты не соответствуют действующим требованиям. В единичных случаях наблюдается снижение работы удара ниже допустимого уровня (см. табл. 1 и требования к работе удара в табл. 2).

Была определена *цель исследования* — поиск взаимосвязи между наблюдаемыми низкими значениями работы удара и особенностями формирования структуры в ЗТВ при сварке труб на основе проведения системных исследований и моделирования тепловых процессов в ЗТВ.

Методика исследования

В работе применялись металлографические методы исследования, измерение твердости, анализ химического состава, микрорентгеноструктурный анализ (МРСА) и имитационное моделирование. Имитация цикла двухпроходной сварки проводилась на dilatометре Vöhr Thermoanalyse DIL805 с использованием цилиндрических образцов длиной 10 мм, диаметром 4 мм [11–13]. Исследовались образцы после имитации термических циклов, характерных для участка, где ЗТВ от первого прохода перекрывается ЗТВ от второго прохода (см. рис. 1). Моделируемый цикл при однократном нагреве состоял из нагрева индукционным нагревателем со скоростью 250 °C/с до $T_{\max 1}=1350$ °C, кратковременной выдержки при этой температуре, охлаждения со скоростью ω_1 (20 и 50 °C/с) до 250 °C, повторного нагрева до $T_{\max 2}$ ($700, 750, 800, 850, 900, 950$ °C), кратковременной выдержки и охлаждения со скоростью ω_2 (1 и 5 °C/с), что соответствует тепловой обстановке в ЗТВ от области крупного зерна до области отпуска (рис. 3).

Температуры начала (T_s) и конца (T_f) превращения аустенита при охлаждении определялись путем обработки полученных dilatометрических кривых [12]. Замеры твердости производились на микротвердометре AFFRI DM

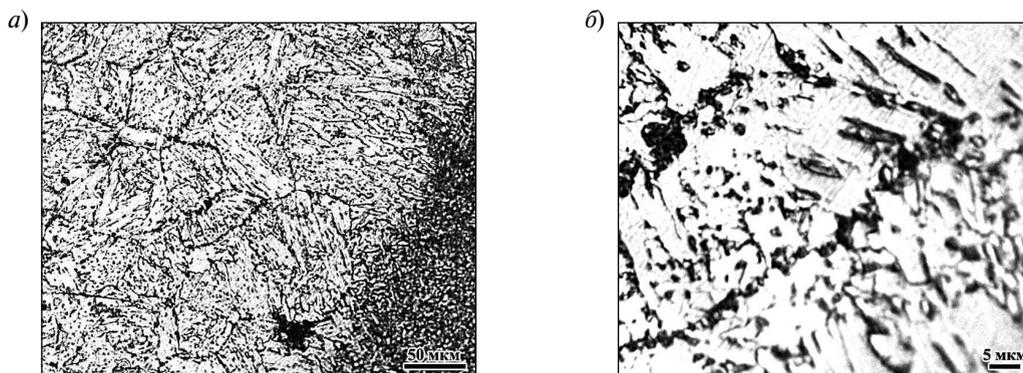


Рис. 2. Микроструктура стали марки К70 в ЗТВ рядом со швом трубы:
а — структура в области зоны сплавления; б — область крупного зерна

Таблица 1

Результаты испытаний на ударный изгиб сварных соединений труб категории прочности К70, толщиной 27

| Температура испытания, °С | Работа удара, KV / KV_{cp} , Дж | | |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| | Металл шва | Зона сплавления | Зона сплавления +2мм |
| -30 | <u>171,4; 166,6; 182,2</u> 173,4 | <u>70,0; 61,9; 66,9</u> 66,3 | <u>205,9; 210,6; 190,4</u> 202,3 |
| -40 | <u>160,5; 167,3; 167,1</u> 165,0 | <u>44,6; 39,4; 37,5</u> 40,5 | — |
| -60 | <u>133,6; 143,8; 148,6</u> 142,0 | <u>34,9; 43,5; 36,6</u> 38,3 | <u>36,7; 48,0; 51,7</u> 45,5 |

Таблица 2

Требования к трубам X80, X90, К70 для магистральных трубопроводов

| Название параметра, ед. измерения | Значение параметра | | | | | |
|---|--------------------------|-------------------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| | X80 | | X90 | | К70 | |
| | Основной металл | Шов и ЗТВ* | Основной металл | Шов и ЗТВ | Основной металл | Шов и ЗТВ |
| Предел текучести, МПа | ≥ 555 | ≥ 555 | ≥ 625 | ≥ 625 | ≥ 590 | ≥ 590 |
| Предел прочности, МПа | ≥ 640 | ≥ 640 | ≥ 695 | ≥ 695 | ≥ 690 | ≥ 690 |
| Относительное удлинение, % | ≥ 18 | | ≥ 17 | | ≥ 16 | |
| Работа удара KV или ударная вязкость KVC при -40 °С | ≥ 250 Дж/см ² | ≥ 70 Дж/см ² | ≥ 140 Дж | ≥ 40 Дж | ≥ 80 Дж | ≥ 40 Дж |

8А с нагрузкой 100 г по телу зерен, по границам зерен и вблизи них как на образцах-имитаторах, так и на реальных сварных соединениях.

Все исследования проводились на сталях для магистральных трубопроводов класса прочности X80, X90, К70 (см. табл. 2).

Результаты исследований и их обсуждение

Полученные данные по температурам начала (T_s) и конца (T_f) превращения аустенита при охлаждении позволили построить их зависимости от максимальной температуры (T_{max}) и скорости охлаждения ($\omega_{8/5}$) при температурах наименьшей устойчивости аустенита в интервале 800–500 °С (рис. 4).

Анализ этих закономерностей, показывает, что для термических циклов, укладываемых в пределы $900\text{ °С} \leq T_{max} \leq 1350\text{ °С}$, независимо от способа сварки при условии $\omega_{8/5} = \text{const}$ устойчивость аустенита увеличивается по мере снижения T_{max} (рис. 4, а). Это следует соотносить с известными из практики данными: на участке крупного зерна скорость охлаждения растет при

увеличении толщины деталей, снижении погонной энергии и росте концентрации вводимой энергии. Установлено также, что в исследованном диапазоне параметров при условии $T_{max} = \text{const}$ с увеличением скорости охлаждения независимо от T_{max} происходит понижение медианы температурного интервала начала и конца превращения аустенита (рис. 4, б).

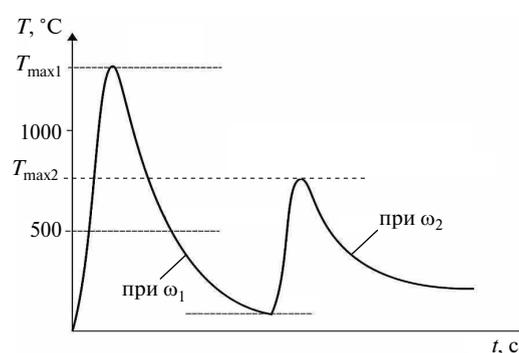


Рис. 3. Схема термического цикла двухпроходной сварки в ЗТВ при его моделировании на образцах-имитаторах

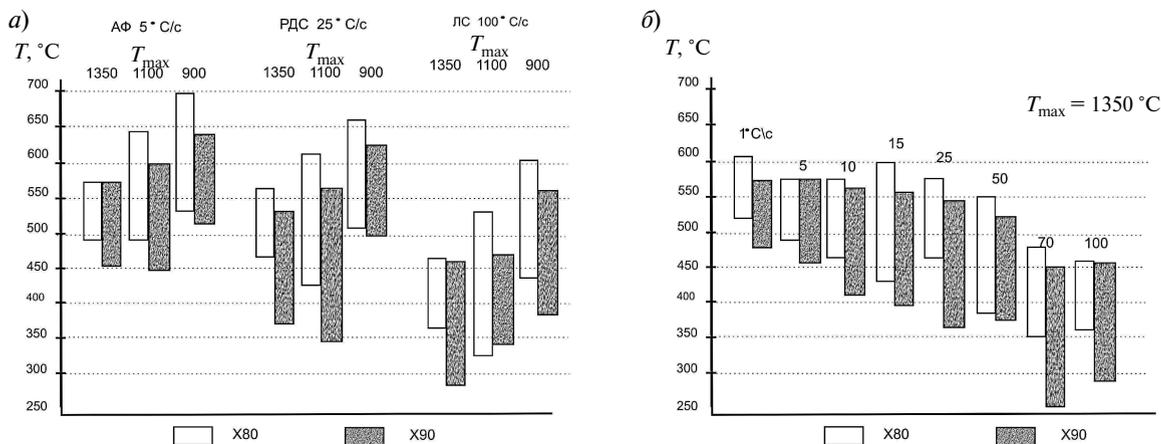


Рис. 4. Температуры начала и конца превращения аустенита при охлаждении в зависимости от максимальной температуры T_{max} и скорости охлаждения $\omega_{8/5}$: а — скорости охлаждения соответствуют процессу сварки под флюсом (АФ), ручной, дуговой сварке (РДС) и лазерной сварке (ЛС); б — нагрев до температуры $T_{\text{max}} = 1350$ °С при скорости охлаждения от 1 до 100 °С/с

Моделирование процессов на участке крупного зерна ЗТВ показало, что в образцах стали X80 (K65) после нагрева до $T_{\text{max}} = 1350$ °С при низких скоростях охлаждения, характерных для сварки под флюсом, происходит образование бейнита. С увеличением скорости охлаждения (более 15 °С/с для стали X80 и более 10 °С/с для стали X90) в структуре появляется речный мартенсит. При нагреве до $T_{\text{max}} = 1100$ °С во всем исследуемом диапазоне скоростей охлаждения формируются бейнитные структуры. При понижении температуры образцов до $T_{\text{max}} = 900$ °С в широком диапазоне скоростей в структуре исследуемых сталей образуется феррит с участками гранулярного бейнита. С понижением класса прочности сталей происходит расширение интервала скоростей образования феррита. В диапазоне максимальных температур нагрева 900–1350 °С с увеличением прочности стали растет дисперсность структуры металла образцов. При нагреве ниже 850 °С характерна структура бейнита с аустенито-мартенситными участками, образование которых происходит в результате частичного превращения в аустенит при нагреве и последующего охлаждения.

После нагрева до температуры 900 °С и охлаждения со скоростью $\omega_{8/5} = 10$ °С/с (характерной для сварки продольных швов труб) и со скоростью $\omega_{8/5} = 50$ °С/с (сварка кольцевых швов труб) в исследуемых сталях происходит снижение твердости не более чем на 5–10 % от

твердости основного металла в результате формирования структуры с преобладанием полигонального феррита. Повышение твердости после нагрева до 750–800 °С и охлаждения со скоростями 10 и 50 °С/с связано с процессами частичного превращения структуры в аустенит.

Установлено, что при термическом цикле сварки исследуемых сталей, характерном для ручной сварки с низкой погонной энергией, значительное повышение твердости (более 300 HV) возможно при нагреве до 1350 °С вследствие образования мартенситной структуры (до 25 %). При высокой погонной энергии (сварка под флюсом) основной проблемой может быть снижение твердости как на участке крупного зерна ЗТВ, где образуется бейнитная структура с твердостью менее 280 HV, так и на участках, нагреваемых до температур 850–900 °С.

Имитационные исследования показали, что при сварке продольных швов труб для уменьшения протяженности области с пониженной твердостью на участке полной перекристаллизации ЗТВ (с обеспечением твердости не выше нормы на участке крупного зерна) для стали X90 интервал скоростей охлаждения $\omega_{8/5}$ должен составлять 10–15 °С/с, для стали X80—10–25 °С/с.

Исследование реальных сварных соединений труб из стали X80 показало, что на участке крупного зерна ЗТВ происходит формирование бейнитной структуры, а на участке полной перекристаллизации — структуры мелкозернистого

феррита, что согласуется с результатами, полученными на образцах этой стали при имитации термических воздействий при сварке.

Микроструктурный анализ образцов показал отсутствие каких-либо особых выделений на границах зерен после проведения однократного нагрева (рис. 5).

При моделировании двухпроходной многодуговой сварки продольных швов труб из стали К70 установлено, что повторный нагрев влияет на ЗТВ предыдущего валика только в корне шва, и это выражается в основном в измельчении структуры в области крупного зерна, сформированной при сварке первого прохода. Имитация показала, что наиболее существенные изменения претерпевает зона крупного зерна, сформированная в корне шва при первом проходе, под воздействием термического цикла от второго прохода в интервале 950–850 °С и скоростях охлаждения $\omega_2 \geq 10$ °С/с. Причем при $T_{\max 2} = 950$ °С степень измельчения структуры очень высока не только при больших, но и при относительно низких скоростях охлаждения (до 5 °С/с). После повторного нагрева образца в структуре металла, соответствующего области вблизи зоны сплавления, происходят специфические изменения.

Установлено, что относительно низкие температуры повторного нагрева (до 700 °С) приводят к появлению выделений в виде сплошных окантовок зерен (рис. 6, а). При повышении температуры (до 750 °С), выделения на границах превращаются в сплошную окантовку (рис. 6, б, в, г). При увеличении температуры повторного нагрева размер выделений уменьшается (рис. 6, е, д), которые с ростом температуры превращаются в цепочки, уменьшаются в размерах при 800 °С

и полностью исчезают при 950 °С (рис. 6, ж). Было отмечено, что количество выделений по границам зерен зависит от скорости охлаждения как при первом, так и втором термическом цикле.

Моделирование процессов при различных режимах первого цикла (1350 °С — 50 °С/с; 1350 °С — 20 °С/с) позволило установить, что с понижением скорости охлаждения происходит укрупнение выделений по границам зерен (рис. 6, в, з). Так как снижение скорости охлаждения соответствует росту погонной энергии при сварке, *установленная при моделировании связь скорости охлаждения с объемом выделений по границам зерен может рассматриваться как одна из причин появления в ЗТВ низких результатов с ростом погонной энергии при испытаниях на ударный изгиб (выпады по работе удара).*

Наблюдаемые выделения в интервале 700–800 °С более четко выражены при большей скорости охлаждения во втором цикле (5 °С/с), что опровергает возможность объяснения причин данных образований как выделения карбидов (рис. 6, б, з). Их появление на границах можно объяснить так: воздействие высоких температур при незначительном времени пребывания металла выше точки A_{c3} не позволяют выровнять химический состав по объему аустенитных зерен, а поскольку скорость диффузии на границах зерен примерно на 3 порядка выше, чем по телу зерна, то в результате границы обогащаются углеродом и легирующими элементами.

При нагреве в межкритический интервал 800–900 °С образование аустенита начинается не только на границах, но и внутри зерен. Степень обогащения углеродом и легирующими элементами образовавшегося по границам аустенита (по сравнению с вариантом нагрева до



Рис. 5. Структура стали марки К70:

а — исходная; б — после однократного быстрого нагрева до 750 °С и охлаждения со скоростью 5 °С/с;
в — после однократного быстрого нагрева до 1350 °С и охлаждения со скоростью 50 °С/с

750 °С) уменьшается, соответственно снижается его устойчивость при охлаждении. Если для скорости охлаждения 5 °С/с после нагрева до 800 °С на границах отдельных зерен еще можно наблюдать мартенсито-бейнитную оторочку (рис. 6, е), то при скорости охлаждения 1 °С/с превращение начинается с выделения бейнитного феррита (рис. 6, д). После нагрева до температуры 900 °С (выше точки A_{c3}) происходит полная перекристаллизация структуры — границы крупных исходных зерен исчезают, однако химическая неоднородность структуры еще сохраняется, и на месте бывших границ можно наблюдать отдельные участки мартенситно-бейнитной структуры (рис. 6, д).

Для более детального исследования структуры образующихся окантовок зерен был про-

веден многократный нагрев образца по режиму, при котором наблюдается интенсивное образование новой структурной составляющей — нагрев до 750 °С и охлаждение со скоростью 5 °С/с (рис. 7).

Образовавшаяся структурная составляющая состоит из чрезвычайно мелких кристаллов игольчатой формы. Прилегающие к ней внутренние области зерна из-за обеднения легирующими элементами потеряли отпускостойчивость, что привело к исчезновению следов ориентированного превращения. Результаты МРСА подтвердили перераспределение легирующих элементов, в частности увеличение их концентрации в выделениях на 15–20 % и соответствующее обеднение прилегающих к выделениям областей зерен такими легирующими

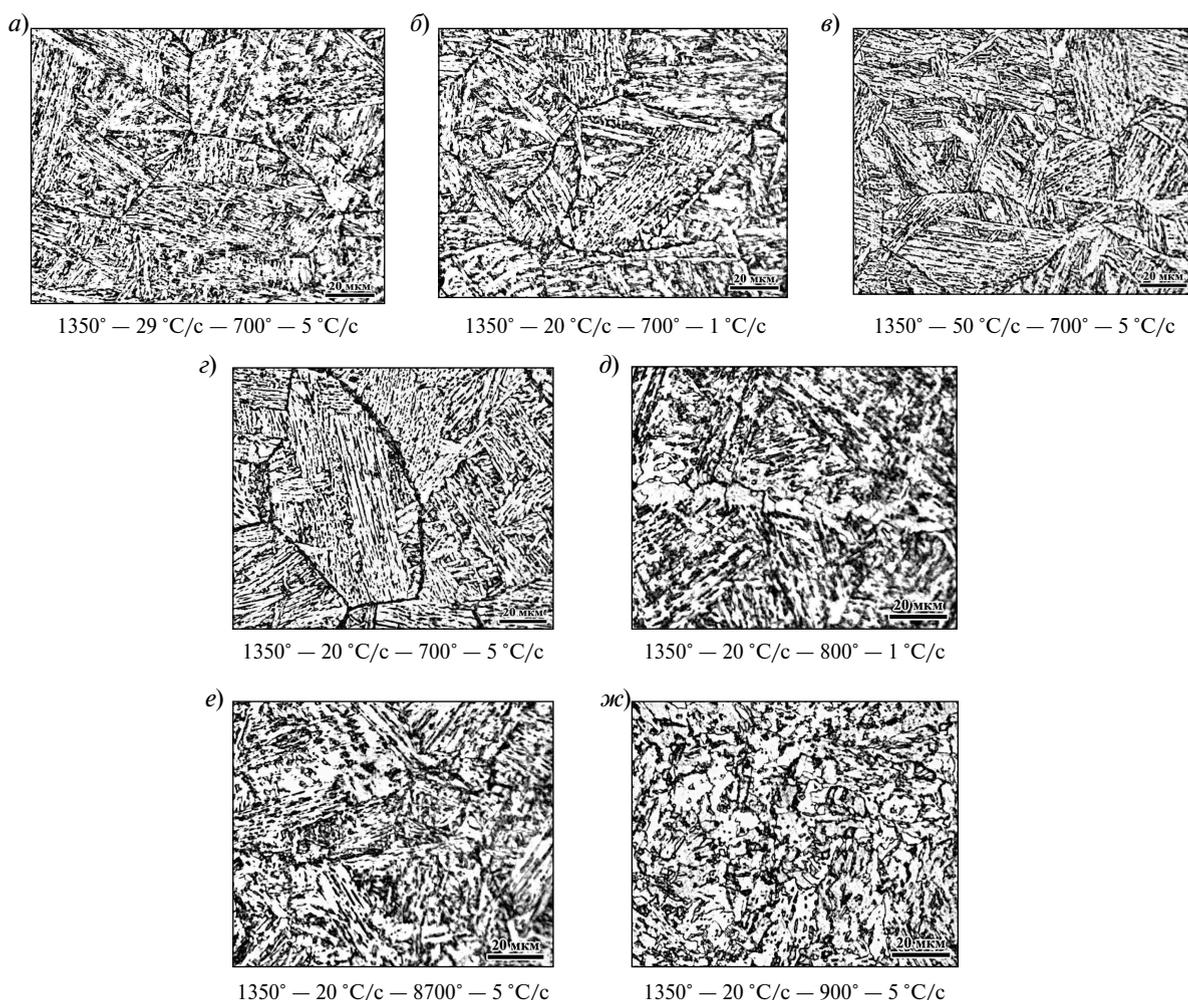


Рис. 6. Структура металла образцов, имитирующих нагрев применительно к ЗТВ рядом со швом (нагрев до 1350 °С), после повторного нагрева до различных температур

элементами как Mn, Ni, Mo и V при среднем содержании в исследуемой стали 1,75 %Mn, 0,30 %Ni, 0,23 %Mo, 0,023 %V. Аналогичные результаты при исследованиях ЗТВ стали марки 10ГН2МФА после сварки с погонной энергией 3–5 кДж/мм были получены А.С. Зубченко и соавторами, которые с помощью МРСА выявили еще более высокое содержание легирующих элементов на границах крупных зерен по сравнению с основой (25 % и более) [14].

Измерения микротвердости образцов после имитационного повторного нагрева до 750 °С показали повышенные ее значения у наблюдаемых выделений по границам (400–430 ед.) по сравнению с металлом вблизи границ (360–370 ед.) и телом зерна (340–350 ед.). На реальных сварных соединениях получены аналогичные результаты (табл. 3).

Таблица 3

Данные измерений микротвердости, ед.

| Место измерения | По границам зерен | Рядом с границей | В теле зерна |
|------------------|-------------------|------------------|--------------|
| Образец-имитатор | 396–430 | 356–368 | 341–350 |
| ЗТВ трубы | 387–420 | 360–366 | 324–347 |

Измерения микротвердости металла при иных режимах моделирования показали максимальный уровень 370 ед., что подтверждает предположение о повышенной хрупкости у выделившихся включений. При верификации этих данных на реальных сварных соединениях получены аналогичные результаты.

Анализ полученных закономерностей при моделировании тепловых воздействий на стали X80, X90, K70 в ЗТВ при двухпроходной сварке труб показывает, что для термических циклов, укладываемых в пределы $900\text{ °C} \leq T_{\max} \leq 1350\text{ °C}$, независимо от способа сварки при условии $\omega_{8/5} = \text{const}$ устойчивость аустенита увеличивается по мере снижения T_{\max} . Установлено, что в исследованных диапазонах параметров при условии $T_{\max} = \text{const}$ увеличение скорости охлаждения независимо от T_{\max} ведет к понижению медианы температурного интервала начала и конца превращения аустенита.

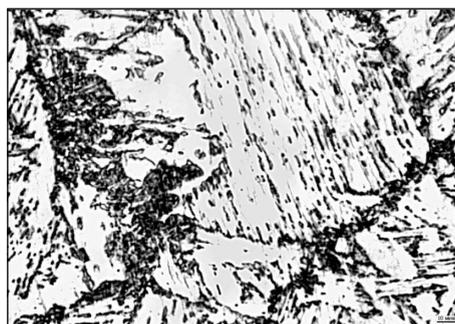


Рис. 7. Микроструктура образца-имитатора после нагрева по режиму: (1350 °С, 50 °С/с)–(750 °С, 5 °С/с) x 5

Выявлена взаимосвязь между режимами имитационного нагрева и наблюдаемыми специфическими структурами при первичном нагреве по режиму $T_{\max 1} \times \omega_1 = 1350\text{ °C} \times 50\text{ °C/c}$ и повторном нагреве до температур $T_{\max 2} = 700\text{--}800\text{ °C}$ и скоростях охлаждения $\omega_2 = 1\text{--}5\text{ °C/c}$. Специфические структуры в области частичной перекристаллизации ЗТВ образуются при 700 °С и полностью исчезают при 900 °С. Появление их связано исключительно с повторным нагревом (имитирующим второй проход) в области температур точки A_{s1} . Понижение скорости охлаждения на первом термическом цикле (что соответствует росту погонной энергии) способствует укрупнению выделений по границам зерен. Каждый последующий нагрев в указанном интервале температур также способствует их увеличению в размерах.

Установлено, что появляющаяся при термических воздействиях темнотравящаяся окантовка границ крупных зерен является участками мартенсито-бейнитной структуры, обогащенными углеродом и легирующими элементами. Они имеют низкую сопротивляемость хрупким разрушениям. Это позволяет предположить взаимосвязь между такими образованиями и снижением работы удара в ЗТВ продольных швов труб большого диаметра.

Данные, полученные при имитации режимов сварки, могут быть использованы для прогнозирования свойств и структуры, формирующейся в ЗТВ, и применены при разработке технологических мероприятий по борьбе с деградацией структуры и свойств в ЗТВ при сварке низколегированных сталей в заводских условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Русакова В.В., Лобанова Т.Л.** Перспективы применения высокопрочных труб категории прочности К65 (Х80) для проектов дальнего транспорта газа // Наука и техника в газовой промышленности. 2009. №1. С.4–7.
2. **Алексеева Т.Н., Круглова А.А., Орлов В.В., Хлусова Е.И., Немтинов А.А.** Исследование особенностей формирования структуры высокопрочных низколегированных сталей для труб большого диаметра при термомеханической обработке // Вопросы материаловедения. 2007. № 1(49). С. 32–42.
3. **Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И., Орлов В.В. [и др.]** Высокопрочные стали для магистральных трубопроводов // Вопросы материаловедения. 2009. № 3(59). С. 127–137.
4. **Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И.** Структура и свойства хладостойких сталей для конструкций северного исполнения // Вопросы материаловедения. 2006. № 1(45). С. 24–42.
5. **Гежа В.В., Шекин С.И.** Новые материалы для автоматической сварки сталей категорий Х90-Х100 для магистральных трубопроводов // Доклады Санкт-Петербургской междунар. научно-техн. конф., 16–18 октября 2012 г. «Петраньевские чтения. Сварочные материалы— 2012». СПб. Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 135–140.
6. **Петров Г.Л., Тумарев А.С.** Теория сварочных процессов. М.: Высшая школа. 1977. 392с.
7. **Ардентов В.В., Малышевский В.А., Семичева Т.Г. [и др.]** Структура и свойства зоны термического влияния высокопрочной конструкционной стали // Физика и химия обработки материалов. 1985. №5. С. 119–125.
8. **Горынин И.В., Малышевский В.А., Легостаев Ю.Л., Грищенко Л.В.** Высокопрочные свариваемые стали // Вопросы материаловедения, 1999. №3(20). С. 21–29.
9. **Иванов А.Ю., Иванов С.Ю., Круглова А.А., Орлов В.В., Сулягин Р.В., Шарапова Д.М.** Прогнозирование структуры зоны термического влияния трубной стали класса прочности Х80 // Сб. докл. XV междунар. научн.-техн. конф. «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций». Санкт-Петербург 27–29 октября 2009. СПб.: Изд-во СПбГУНиПТ, 2009. С. 243–248.
10. **Шарапова Д.М., Виноградов О.П., Круглова А.А., Орлов В.В.** Моделирование тепловых воздействий в зоне термического влияния высокопрочной трубной стали класса прочности К70 // Тезисы докладов IX конф. молодых учен. и спец. 23–5 июня 2010г., Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во ЦНИИ КМ «Прометей», 2010. С. 71.
11. **Иванов А.Ю., Сулягин Р.В., Орлов В.В., Круглова А.А., Шарапова Д.М., Иванов С.Ю.** Исследование структуры зоны термического влияния сварного соединения из стали класса прочности Х80 после имитационного моделирования термических воздействий // Вопросы материаловедения. 2010. № 1 (61). С. 31–39.
12. **Орыщенко А.С., Хлусова Е.И., Шарапов М.Г.** Металловедение конструкционных свариваемых сталей. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 66 с.
13. **Шарапова Д.М.** О необходимости применения современного инструментария при исследовании структур в зоне термического влияния судостроительных сталей // Доклады Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции «Петраньевские чтения. Сварочные материалы-2012». 16–18 октября 2012 г. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 202–209.
14. **Зубченко А.С., Федоров А.В., Нечаев Ю.В.** Исследование причин растрескивания сварных соединений толстостенных сосудов давления при последующей термической обработке // Сварка и диагностика. 2009. № 2. С. 21–25.

REFERENCES

1. **Rusakova V.V., Lobanova T.L.** Perspektivy primeneniya vysokoprochnykh trub kategorii prochnosti K65 (Kh80) dlya proyektov dalnego transporta gaza. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*. 2009. №1. S. 4–7. (rus.)
2. **Alekseyeva T.N., Kruglova A.A., Orlov V.V., Khlusova Ye.I., Nemhnov A.A.** Issledovaniye osobennostey formirovaniya struktury vysokoprochnykh nizkolegirovannykh staley dlya trub bolshogo diametra pri termomekhanicheskoy obrabotke. *Voprosy materialovedeniya*. 2007. № 1 (49). S. 32–42. (rus.)
3. **Rybin V.V., Malyshevskiy V.A., Khlusova Ye.I., Orlov V.V. [i dr.]** Vysokoprochnyye stali dlya magistralnykh truboprovodov. *Voprosy materialovedeniya*. 2009. № 3(59). S. 127–137. (rus.)
4. **Rybin V.V., Malyshevskiy V.A., Khlusova Ye.I.** Struktura i svoystva khladostoykikh staley dlya konstruksiy severnogo ispolneniya. *Voprosy materialovedeniya*. 2006. № 1(45). S. 24–42. (rus.)
5. **Gezha V.V., Shekin S.I.** Novyye materialy dlya avtomaticheskoy svarki staley kategoriy Kh90-Kh100 dlya magistralnykh truboprovodov. *Doklady Sankt-Peterburgskoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Petraneyevskiy chteniya. Svarochnyye materialy—2012»*. 16–18 oktyabrya 2012 g. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012. S. 135–140. (rus.)

6. **Petrov G.L., Tumarev A.S.** Teoriya svarochnykh protsessov. M.: Vysshaya shkola, 1977. 392 s. (rus.)
7. **Ardentov V.V., Malyshevskiy V.A., Semicheva T.G. [i dr.]**. Struktura i svoystva zony termicheskogo vliyaniya vysokoprochnoy konstruktsionnoy stali. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 1985. №5. S. 119–125. (rus.)
8. **Gorynin I.V., Malyshevskiy V.A., Legostayev Yu.L., Grishchenko L.V.** Vysokoprochnyye svarivayemye stali. *Voprosy materialovedeniya*. 1999. №3(20). S. 21–29. (rus.)
9. **Ivanov A.Yu., Ivanov S.Yu., Kruglova A.A., Orlov V.V., Sulyagin R.V., Sharapova D.M.** Prognozirovaniye struktury zony termicheskogo vliyaniya trubnoy stali klassa prochnosti Kh80. *Sb. dokladov XV mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf. «Problemy resursa i bezopasnoy ekspluatatsii materialov i konstruktsiy»*. Sankt-Peterburg 27–29 oktyabrya 2009g. SPb.: Izd-vo SPbGUNIPT, 2009. S. 243–248. (rus.)
10. **Sharapova D.M., Vinogradov O.P., Kruglova A.A., Orlov V.V.** Modelirovaniye teplovykh vozdeystviy v zone termicheskogo vliyaniya vysokoprochnoy trubnoy stali klassa prochnosti K70. *Tezisy dokladov IX konf. molodykh uchen. i spets. 23–5 iyunya 2010g.*, Sankt-Peterburg. SPb.: Izd. TsNII KM «Prometey», 2010. S. 71. (rus.)
11. **Ivanov A.Yu., Sulyagin R.V., Orlov V.V., Kruglova A.A., Sharapova D.M., Ivanov S.Yu.** Issledovaniye struktury zony termicheskogo vliyaniya svarnogo soyedineniya iz stali klassa prochnosti Kh80 posle imitatsionnogo modelirovaniya termicheskikh vozdeystviy. *Voprosy materialovedeniya*. 2010. № 1 (61). S. 31–39. (rus.)
12. **Oryshchenko A.S., Khlusova Ye.I., Sharapov M.G.** Metallovedeniye konstruktsionnykh svarivayemykh staley. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 66 s. (rus.)
13. **Sharapova D.M.** O neobkhodimosti primeneniya sovremennogo instrumentariya pri issledovanii struktur v zone termicheskogo vliyaniya sudostroitelnykh staley. *Doklady Sankt-Peterburgskoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, «Petranyevskiy chteniya. Svarochnyye materialy-2012»*. 16–18 oktyabrya 2012 g. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. S. 202–209. (rus.)
14. **Zubchenko A.S., Fedorov A.V., Nechayev Yu.V.** Issledovaniye prichin rastreskivaniya svarnykh soyedineniy tolstostennykh sudov davleniya pri posleduyushchey termicheskoy obrabotke. *Svarka i diagnostika*. 2009. № 2. S. 21–25. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПРЯХИН Евгений Иванович — профессор доктор технических наук заведующий кафедрой материаловедения и технологии художественной обработки материалов, декан механического факультета Национального минерально-сырьевого университета «Горный»; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2; e-mail: mthi@spmi.ru.

ШАРАПОВА Динаида Михайловна — аспирант кафедры материаловедения и технологии художественной обработки материалов механического факультета Национального минерально-сырьевого университета «Горный»; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2; e-mail: mthi@spmi.ru.

AUTHORS

ПРЯХИН Eugene I. — Professor, Ph.D., head of the «Materials Science and Technology artistic processing of materials,» the dean of the Faculty of Mechanical, National Mineral Resources University «Gornii», Russia, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line, 2; E-mail: mthi@spmi.ru.

SHARAPOVA Dinaida M. — St graduate student «Materials Science and Technology artistic processing of materials» National Mineral Resources University «Gornii», Russia, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line, 2; E-mail: mthi@spmi.ru.

УДК 541.13

В.П. Юркинский, Е.Г. Фирсова

ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ ХЛОРИД ЛИТИЯ — БУТАНОЛ — ВОДА

V.P. Yurkinisky, E.G. Firsova

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF LITHIUM CHLORIDE — BUTANOL — WATER SOLUTIONS

Изучена электропроводимость растворов хлорида лития в системе «бутиловый спирт — вода» в интервале температур 291–342 К с использованием кондуктометрического метода. Определены удельная и мольная электропроводимость растворов в зависимости от содержания воды и хлорида лития.

ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬ; КОНДУКТОМЕТРИЯ; РАСТВОРЫ ХЛОРИДА ЛИТИЯ; БУТИЛОВЫЙ СПИРТ; ВОДНО-СПИРТОВЫЕ РАСТВОРЫ.

The electrical conductivity of lithium chloride solutions in the butanol –water system is studied in the temperature range 291–342 K using a conductometric method. Specific and molar conductivities of the solutions are determined depending on the contents of water and lithium chloride.

ELECTRICAL CONDUCTIVITY; CONDUCTOMETRY; LITHIUM CHLORIDE SOLUTIONS; BUTANOL; AQUEOUS-ALCOHOL SOLUTIONS.

Растворы хлоридов щелочных металлов в низших алифатических спиртах, в частности растворы хлорида лития в бутиловом спирте, находят практическое применение в современных технологиях [1–4]. Их используют для разделения хлоридов с учетом их различной растворимости [2], а также для получения алкоголятов различных металлов в технологии получения высокочистых оксидов металлов [3, 4].

Известно, что физико-химические свойства спиртов существенно зависят от содержания в них растворенной воды [3–6]. В связи с этим актуальной задачей является разработка экспресс-метода оценки содержания воды в спиртовых растворах. Одним из таких методов может служить кондуктометрический метод анализа [7, 8].

При разработке кондуктометрического метода определения содержания воды в водно-спиртовых растворах необходимо знать их электропроводимость. Знание электропроводимости также необходимо для выбора оптимального состава рабочего электролита в технологии получения высокочистых оксидов [3, 4].

В научной литературе есть сведения об электропроводимости органических и водно-органических электролитов, однако влияние содержания воды на эту характеристику исследовано недостаточно [6].

В продолжение ранее проведенных исследований [9] в настоящей статье рассматривается электропроводимость растворов хлорида лития в системе «бутиловый спирт — вода» в зависимости от температуры и концентрации соли.

Экспериментальная часть

Исследования проводили в области температур 290–323 К. Электропроводимость растворов определяли кондуктометрическим методом.

В работе использовалась U-образная электрохимическая ячейка капиллярного типа с диаметром капилляра 1,0 мм и длиной 5–7 см. В качестве материала электродов применялся никель. Электрическое сопротивление растворов измерялось с помощью автоматического моста переменного тока Е7–15 на частоте 1 кГц. Постоянная ячейки определялась стандартным методом с использованием 0,1 М раство-

ра хлорида калия. Значение постоянной ячейки составило $K = 590,6 \pm 3,7 \text{ см}^{-1}$. Измерения сопротивления электрохимической ячейки проводили в динамическом режиме изменения температуры. Нагрев ячейки осуществляли со скоростью $15 \text{ град}\cdot\text{ч}^{-1}$ ($0,25 \text{ град}\cdot\text{мин}^{-1}$). При измерении сопротивления раствора нагрев временно прекращали с целью стабилизации температуры в ячейке. При такой методике удавалось поддерживать в ячейке постоянство температуры во время проведения измерений с точностью $\pm 0,1^\circ$.

В работе использовали безводный LiCl квалификации х.ч. и абсолютированный бутиловый спирт квалификации х.ч. (содержание воды менее $0,05\%$ масс.). С целью удаления возможных следов влаги хлорид лития дополнительно сушился при температуре 200°C в течение 4–6 часов, а далее хранился в герметичной таре в эксикаторе.

Растворы хлорида лития в смесях «бутиловый спирт — вода» готовили смешением расчетного количества хлорида лития или водного концентрированного раствора LiCl (40% масс.) в бутиловом спирте. Концентрацию хлорида лития изменяли в пределах $0,01$ – $0,93$ моль/л, а содержание воды составляло 0 – 17% об. В отдельных экспериментах концентрация хлорида лития в исследуемых растворах контролировалась пламенно-эмиссионным методом с использованием атомно-абсорбционного спектрофотометра AAS-3 («Karl Zeiss»).

На основании экспериментальных данных была рассчитана удельная электропроводимость (χ , См/см) исследованных растворов, получены температурные зависимости $\chi = f(T)$ и изотермы $\chi = f(C_{\text{LiCl}})$ при различных содержаниях воды в водно-спиртовом растворе.

В качестве примера в табл. 1 представлен ряд значений удельной электропроводимости

Таблица 1

Удельная электропроводимость растворов хлорида лития в безводном спирте и в смесях «бутиловый спирт — H_2O » при содержании воды 3% об.

a)

| T, К | $C_{\text{H}_2\text{O}}$, % об. | $\chi \cdot 10^4$, См/см, для трех значений C_{LiCl} , моль/л | | |
|-------|----------------------------------|---|-------|-------|
| | | 0,101 | 0,157 | 0,201 |
| 292,0 | 0,0 | 2,08 | 2,81 | 3,30 |
| 293,1 | | 2,11 | 2,84 | 3,34 |
| 294,6 | | 2,16 | 2,93 | 3,48 |
| 297,0 | | 2,22 | 2,98 | 3,53 |
| 299,6 | | 2,29 | 3,08 | 3,67 |
| 302,0 | | 2,36 | 3,16 | 3,85 |
| 304,5 | | 2,42 | 3,28 | 4,01 |
| 307,0 | | 2,47 | 3,36 | 4,15 |
| 309,5 | | 2,51 | 3,52 | 4,21 |
| 312,0 | | 2,59 | 3,60 | 4,36 |
| 314,5 | | 2,69 | 3,70 | 4,53 |
| 317,0 | | 2,75 | 3,75 | 4,64 |
| 319,5 | | 2,80 | 3,83 | 4,73 |
| 322,0 | | 2,87 | 3,91 | 4,87 |
| 324,5 | | 2,92 | 3,95 | 4,97 |
| 327,0 | | 2,95 | 4,08 | 5,16 |
| 329,5 | | 2,97 | 4,12 | 5,17 |
| 332,0 | | 3,02 | 4,15 | 5,31 |
| 334,5 | | 3,07 | 4,23 | 5,38 |
| 337,0 | | 3,09 | 4,29 | 5,56 |
| 339,6 | | 3,12 | 4,34 | 5,62 |
| 342,0 | | 3,13 | 4,49 | 5,70 |

Окончание табл. 1

б)

| T, К | C _{H₂O} , % об. | χ·10 ⁴ , См/см, при трех значениях C _{LiCl} , моль/л | | |
|-------|-------------------------------------|--|-------|-------|
| | | 0,106 | 0,127 | 0,149 |
| 295,3 | 3,0 | 4,08 | 4,56 | 4,73 |
| 298,0 | | 4,36 | 4,86 | 5,01 |
| 301,0 | | 4,62 | 5,15 | 5,35 |
| 304,1 | | 4,83 | 5,44 | 5,61 |
| 307,0 | | 5,10 | 5,71 | 5,97 |
| 310,0 | | 5,36 | 6,04 | 6,24 |
| 313,0 | | 5,59 | 6,37 | 6,57 |
| 316,5 | | 6,00 | 6,75 | 7,00 |
| 320,0 | | 6,17 | 7,07 | 7,27 |

в зависимости от температуры и концентрации хлорида лития в безводном спирте и при содержании воды в растворе 3 % об.

Как следует из табл. 1, удельная электропроводимость возрастает как с увеличением концентрации хлорида лития и температуры при постоянном содержании воды, так и с увеличением содержания воды в растворе.

На рис. 1 приведен типичный пример температурной зависимости удельной электропроводимости от концентрации в растворе хлорида лития в безводном спирте. Аналогичная зависимость наблюдалась для всех изученных смесей.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с применением стандартной компьютерной программы «ORIGIN».

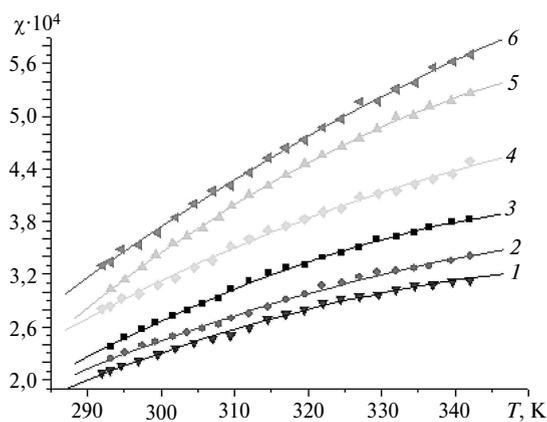


Рис. 1. Зависимость удельной электропроводимости χ , См/см, от температуры для растворов хлорида лития в безводном бутиловом спирте при различных концентрациях хлорида лития C_{LiCl} , моль/л:
1–0,101; 2–0,112; 3–0,124; 4–0,157; 5–0,184; 6–0,201

Анализ зависимости $\chi = f(T)$ (см. рис.1) показал, что для исследованных растворов удельная электропроводимость с увеличением температуры достаточно хорошо описывается полиномом второй степени: $\chi = A + B_1T + B_2T^2$ (A , B_1 и B_2 — постоянные коэффициенты). Значения коэффициентов полиномов для всех исследованных растворов приведены в табл. 2. Были определены также доверительный интервал R и среднеквадратичная ошибка S .

С использованием экспериментальных данных, представленных в табл. 2, построены изотермы зависимости удельной электропроводимости от концентрации хлорида лития при различном содержании воды в исследованных растворах.

На рис. 2 приведен пример зависимостей $\chi = f(C_{LiCl})$ для безводного спирта.

Установлено, что для всех изученных растворов изотермы удельной электропроводимости в зависимости от концентрации хлорида лития имеют линейный вид и выражаются уравнением $\chi = A + B \cdot C$, где C — концентрация LiCl, моль/л; A и B — постоянные коэффициенты.

Здесь же приведены данные, полученные при 293 К в работе [4]. Как видно, наблюдается достаточно хорошее совпадение результатов.

На рис. 3 представлен пример зависимости $\chi = f(C_{H_2O})$ при содержании хлорида лития в растворах 0,106 моль·л⁻¹; она может служить калибровочной кривой для количественного определения содержания воды в изученных водно-спиртовых смесях. Аналогичный вывод был получен нами и для других водно-спиртовых растворов [9].

Таблица 2

Значения коэффициентов полиномов, описывающих зависимость удельной электропроводимости от температуры, для растворов хлорида лития в смесях «бутиловый спирт — вода»

| C_{H_2O} , % об. | C_{LiCl} , моль/л | $\chi = A + B_1 T + B_2 T^2$, См/см | | | R | $S \cdot 10^6$ |
|--------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|-------|----------------|
| | | A | $B_1 \cdot 10^5$ | $B_2 \cdot 10^8$ | | |
| 0 | 0,101 | -0,00243 | 1,488 | -2,003 | 0,998 | 2,13 |
| | 0,112 | -0,00215 | 1,297 | -1,661 | 0,996 | 2,49 |
| | 0,124 | -0,00332 | 2,001 | -2,686 | 0,998 | 1,73 |
| | 0,157 | -0,00280 | 1,672 | -2,121 | 0,996 | 3,12 |
| | 0,184 | -0,00468 | 2,761 | -3,622 | 0,997 | 2,03 |
| | 0,201 | -0,00311 | 1,767 | -2,021 | 0,998 | 3,22 |
| 1,0 | 0,011 | -0,00089 | 0,504 | -0,606 | 0,991 | 1,98 |
| | 0,021 | -0,00306 | 1,830 | -0,261 | 0,998 | 1,14 |
| | 0,032 | -0,00026 | 0,247 | -0,674 | 0,998 | 1,06 |
| | 0,043 | -0,00498 | 3,040 | -4,410 | 0,995 | 2,57 |
| | 0,053 | -0,00860 | 5,431 | -8,191 | 0,990 | 4,41 |
| 2,0 | 0,021 | -0,0011 | 0,568 | -0,429 | 0,975 | 1,03 |
| | 0,043 | -0,00541 | 3,240 | -4,551 | 0,995 | 2,68 |
| | 0,064 | -0,00370 | 2,110 | -2,630 | 0,998 | 3,87 |
| | 0,085 | -0,00431 | 2,590 | -5,491 | 0,998 | 3,23 |
| | 0,106 | -0,00680 | 4,031 | -5,491 | 0,998 | 3,96 |
| 3,0 | 0,043 | 0,00120 | -1,031 | 2,730 | 0,996 | 2,92 |
| | 0,064 | 0,00060 | -0,733 | 2,031 | 0,997 | 3,21 |
| | 0,085 | 0,00070 | -0,927 | 2,650 | 0,998 | 2,80 |
| | 0,106 | -0,00401 | 2,090 | -2,020 | 0,998 | 4,26 |
| | 0,127 | -0,00170 | 0,483 | 0,804 | 0,999 | 2,21 |
| | 0,149 | -0,00320 | 1,451 | -0,674 | 0,999 | 3,18 |
| 4,0 | 0,043 | -0,00260 | 1,430 | -1,561 | 0,997 | 2,92 |
| | 0,085 | -0,00300 | 1,471 | -1,110 | 0,998 | 2,79 |
| | 0,127 | -0,01020 | 7,020 | -126,1 | 0,991 | 6,78 |
| | 0,170 | -0,00360 | 1,450 | -0,814 | 0,996 | 8,21 |
| | 0,191 | -0,00150 | 8,641 | -115,0 | 0,997 | 8,48 |
| | 0,212 | -0,00210 | 2,110 | -5,571 | 0,996 | 8,75 |
| 5,0 | 0,034 | 0,00520 | -3,790 | 7,281 | 0,995 | 6,07 |
| | 0,106 | 0,00920 | -6,801 | 13,10 | 0,994 | 11,1 |
| | 0,191 | 0,00920 | -3,070 | 7,421 | 0,996 | 12,5 |
| | 0,234 | 0,01670 | -11,91 | 22,10 | 0,997 | 12,5 |
| | 0,266 | 0,02590 | -17,90 | 31,91 | 0,995 | 16,1 |
| 7,0 | 0,106 | 0,01760 | -12,01 | 21,10 | 0,990 | 11,5 |
| | 0,159 | 0,00720 | -5,780 | 12,11 | 0,998 | 5,47 |
| | 0,266 | 0,02080 | -14,81 | 27,40 | 0,991 | 21,3 |
| | 0,319 | 0,00910 | -3,870 | 1,381 | 0,998 | 10,2 |
| | 0,372 | 0,01630 | -12,71 | 25,80 | 0,992 | 28,8 |

Окончание табл. 1

| | | | | | | |
|------|-------|---------|--------|-------|-------|------|
| 11,0 | 0,106 | 0,00640 | -5,450 | 11,60 | 0,991 | 17,7 |
| | 0,266 | 0,01630 | -12,01 | 22,61 | 0,995 | 15,7 |
| | 0,372 | 0,02130 | -15,50 | 28,90 | 0,994 | 20,1 |
| | 0,478 | 0,00780 | -3,680 | 2,471 | 0,999 | 5,10 |
| | 0,584 | 0,0171 | -9,760 | 12,31 | 0,995 | 16,1 |
| 17,0 | 0,106 | 0,01580 | -11,40 | 21,01 | 0,990 | 25,9 |
| | 0,266 | 0,04410 | -30,10 | 51,90 | 0,991 | 23,7 |
| | 0,425 | 0,01480 | -11,20 | 21,81 | 0,997 | 10,7 |
| | 0,584 | 0,00880 | -7,391 | 0,159 | 0,999 | 8,2 |
| | 0,743 | 0,0075 | -15,21 | 29,50 | 0,997 | 8,4 |
| | 0,927 | 0,02030 | -15,20 | 29,51 | 0,992 | 28,7 |

Из рис. 3 следует, что зависимость $\chi = f(C_{H_2O})$ линейна и при температуре 298 К описывается уравнением $\chi = (2,270 + 0,663 C_{H_2O}) \cdot 10^{-4}$, где C_{H_2O} — концентрация воды в растворе, (% об.); $R = 0,998$.

С использованием значений удельной электропроводности (см. табл. 2) была рассчитана мольная электропроводность λ , См·см²/моль, растворов хлорида лития.

На рис. 4 представлен пример температурных зависимостей λ для различных концентраций хлорида лития при содержании воды в растворе 3 % об. Вид зависимости $\lambda = f(T)$ был аналогичен для всех исследованных растворов.

Как и в случае удельной электропроводности, политермы мольной электропроводности

нелинейны и описываются полиномом второй степени:

$$\lambda = A + B_1 T + B_2 T^2.$$

С целью выяснения применимости уравнения Кольрауша для изученных водно-спиртовых растворов была исследована зависимость $\lambda = f(\sqrt{C})$. Оказалось, что линейный характер этой зависимости в изученных растворах не наблюдается, и, следовательно, закон Кольрауша для изученных водно-спиртовых растворов неприменим.

Изотермы мольной электропроводности в изученных растворах описываются полиномом второй степени $\lambda = A + B_1 C + B_2 C^2$, на основе которых была проведена оценка мольной электропроводности при бесконечном разбавлении ($\lambda_0 = A$ при $C = 0$ моль/л).

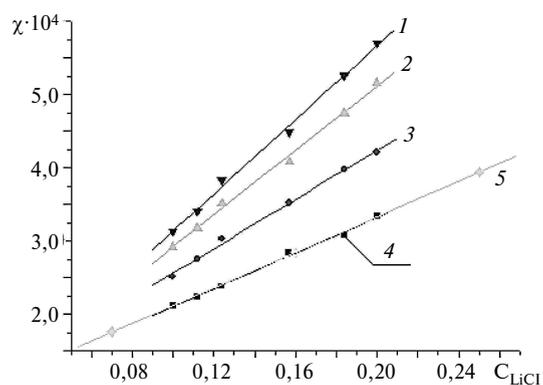


Рис. 2. Зависимость удельной электропроводности χ , См/см, для растворов хлорида лития в безводном бутиловом спирте от концентрации хлорида лития C_{LiCl} , моль/л, при различных температурах:

1—343; 2—320; 3—300; 4—293; 5—293 К [4]

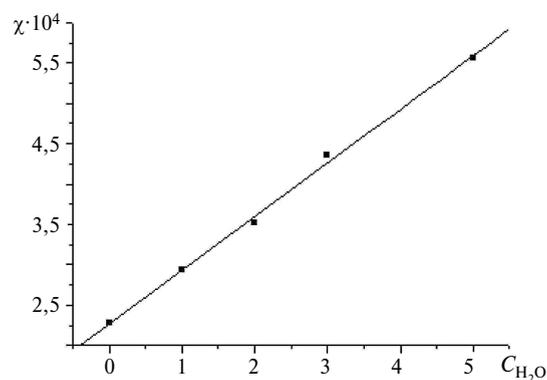


Рис. 3. Зависимость $\chi = f(C_{H_2O})$ (C_{H_2O} , % об.; χ , См·см⁻¹) для растворов хлорида лития ($C_{LiCl} = 0,106$ моль·л⁻¹) в системе «бутиловый спирт — вода» при температуре 298 К

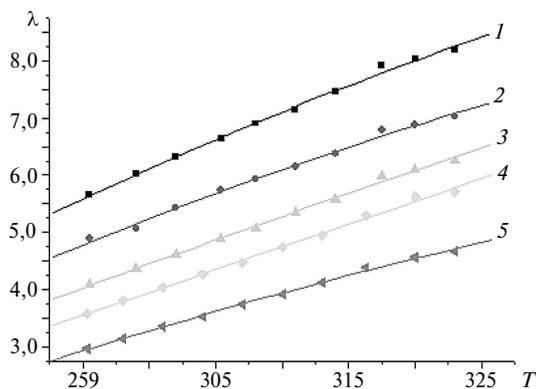


Рис. 4. Зависимость мольной электропроводности λ от температуры для растворов хлорида лития в смеси бутиловый спирт — вода (3 % об.) при различных ($1-0,043$; $2-0,064$; $3-0,085$; $4-0,106$; $5-0,127$) концентрациях хлорида лития C_{LiCl} , моль·л⁻¹

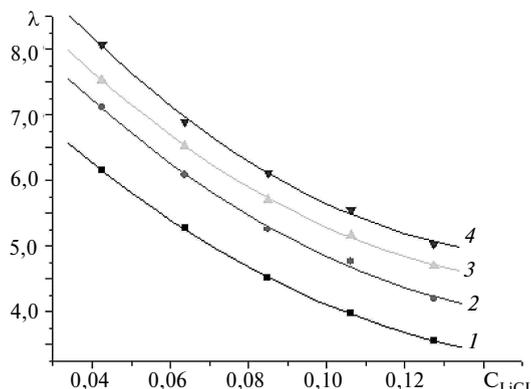


Рис. 5. Зависимость мольной электропроводности λ для растворов хлорида лития в смеси бутиловый спирт — вода (3 % об.) от концентрации хлорида лития C_{LiCl} при различных температурах: $1-300$; $2-310$; $3-315$; $4-320$ К

Из анализа изотерм мольной электропроводности (рис. 5) следует, что с ростом концентрации хлорида лития при постоянном содержании воды в водно-спиртовых растворах λ снижается, как и в случае аналогичных водных растворов [10].

На рис. 6 показан пример зависимости λ_0 от содержания воды (C_{H_2O} , % об.) в спиртовом растворе при температуре 293 К.

Как видно, с увеличением концентрации воды мольная электропроводность при бесконечном разбавлении растворов хлорида лития в смесях «бутиловый спирт — вода» снижается, что обусловлено гидратацией хлорида лития [11] и, соответственно, снижением подвижности ионов лития и хлора.

Зависимость λ_0 , См·см²/моль, — C_{H_2O} , % об., удовлетворительно описывается сложной функцией

$$\lambda_0 = 7,835 + 8,581 \exp(-C_{H_2O}/0,8767).$$

Доверительный интервал составил 0,988.

Установлено, что удельная электропроводность исследованных растворов возрастает с увеличением температуры, причем зависимость $\chi = f(T)$ описывается полиномом второй степени $\chi = A + B_1 T + B_2 T^2$.

Показано, что с ростом концентрации хлорида лития и содержания воды в смесях «бутиловый спирт — вода» ее удельная электропрово-

димость возрастает. Изотермы $\chi = f(C_{LiCl})$, полученные при различном содержании воды в растворах, имеют линейный характер.

Изотерма $\chi = f(C_{H_2O})$, полученная при различном содержании воды в растворах, имеет линейный характер, что позволяет рекомендовать кондуктометрический метод для аналитического определения содержания воды в изученных водно-спиртовых растворах.

Рассчитана мольная электропроводность исследованных растворов. Установлено, что зависимость $\lambda = f(T)$ нелинейна и описывается полиномом второй степени. Показано, что с ростом концентрации хлорида лития в смесях

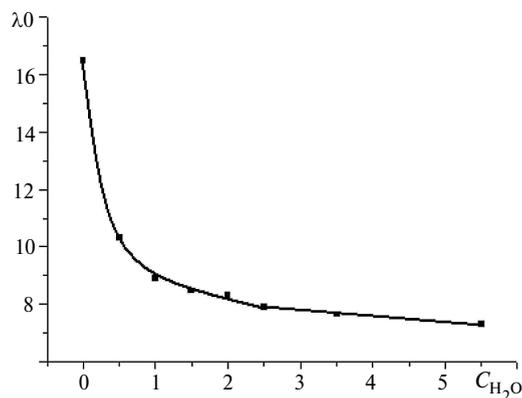


Рис. 6. Зависимость мольной электропроводности при бесконечном разбавлении λ_0 для растворов хлорида лития в смесях бутиловый спирт — вода от содержания воды в растворе C_{H_2O} , % об., при температуре 293 К

«бутиловый спирт — вода» при постоянном содержании воды мольная электропроводимость растворов понижается. Показана неприменимость уравнения Кольрауша для описания изотерм мольной электропроводимости изученных растворов. Изотермы $\lambda = f(C_{\text{LiCl}})$ описываются полиномом второй степени.

Определены величины мольной электропроводимости растворов при бесконечном разбавлении (λ_0). С ростом концентрации воды в исследованных растворах λ_0 уменьшается, что объясняется гидратацией хлорида лития и соответственно снижением подвижности ионов лития и хлора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Томилов А.П.** Электрохимические синтезы в безводных спиртах // *Электрохимия*. 2000. Т. 36. № 2. С. 115–116.
2. **Фурман А.А.** Неорганические хлориды. М.: Химия, 1980. 416 с.
3. **Андрусева С.И., Ковсман Е.П.** Пат. 2073003 (Россия). 1997.
4. **Соловьева Л.И., Ковсман Е.П., Кесслер В.Г., Турова Н.Я.** Пат. 2017712 (Россия). 1994.
5. **Петров А.А., Бальян Х.В., Трощенко А.Т.** Органическая химия. СПб.: Иван Федоров, 2002. 624 с.
6. **Janz G.J., Tomkins R.P.T.** Nonaqueous Electrolytes Handbook. New York and London: Academic Press, 1972. 1108 p.
7. **Будников Г.К., Майстренко В.Н., Вяселев М.Р.**

Основы современного электрохимического анализа. М.: Изд-во «Бином. Лаборатория знаний», 2003. 592 с.

8. **Гриликес М.С., Филановский Б.К.** Контактная кондуктометрия. Теория и практика метода. Л.: Химия, 1980. 176 с.

9. **Юркинский В.П., Фирсова Е.Г., Фефилов И.Н.** Электропроводимость растворов хлорида лития в системе пропиловый спирт — вода // *Журнал прикладной химии*. 2012. Т. 85, № 3. С. 407–411.

10. **Скорчеллетти В.В.** Теоретическая электрохимия. Л.: Химия, 1974. 568 с.

11. **Киргинцев А.Н., Трушников Л.Н., Лаврентьева В.Г.** Растворимость неорганических веществ в воде. Л.: Химия, 1972. 245 с.

REFERENCES

1. **Tomilov A.P.** *Elektrokhimiya*. 2000. T. 36. № 2. S. 115–116. (rus.)
2. **Furman A.A.** *Neorganicheskiye khloridy*. M.: Khimiya, 1980. 416 s. (rus.)
3. **Pat. 2073003 (Rossiya)** / Andrusseva S.I., Kovsman Ye.P. 1997. (rus.)
4. **Pat. 2017712 (Rossiya)** / Solovyeva L.I., Kovsman Ye.P., Kessler V.G., Turova N.Ya. 1994. (rus.)
5. **Petrov A.A., Balyan Kh.V., Troshchenko A.T.** *Organicheskaya khimiya*. SPb.: Ivan Fedorov, 2002. 624 s. (rus.)
6. **Janz G.J., Tomkins R.P.T.** *Nonaqueous Electrolytes Handbook*. New York and London: Academic Press, 1972. 1108 p. (rus.)
7. **Budnikov G.K., Maystrenko V.N., Vyaselev M.R.**

Osnovy sovremennogo elektrokhimicheskogo analiza. M.: Izd-vo «Binom. Laboratoriya znaniy», 2003. 592 s. (rus.)

8. **Grilikhes M.S., Filanovskiy B.K.** *Kontaktnaya konduktometriya. Teoriya i praktika metoda*. L.: Khimiya, 1980. 176 s. (rus.)

9. **Yurkinsky V.P., Firsova, E.G., Fefilov I.N.** *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012. № 85, Vol. 3. S. 407–411. (rus.)

10. **Skorchelletti V.V.** *Teoreticheskaya elektrokhiimiya*. L.: Khimiya, 1974. 568 s. (rus.)

11. **Kirgintsev A.N., Trushnikova L.N., Lavrentyeva V.G.** *Rastvorimost neorganicheskikh veshchestv v vode*. L.: Khimiya, 1972. 245 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЮРКИНСКИЙ Владимир Павлович — доктор химических наук профессор кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: jurkinskij@rambler.ru
ФИРСОВА Елена Германовна — кандидат технических наук доцент кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; тел. (812) 552–63–87.

AUTHORS

YURKINSKY Vladimir P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: jurkinskij@rambler.ru
FIRSOVA Elena G. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; phone: (812) 552–63–87.

УДК 678.6

С.Н. Яковлев

РАСЧЕТ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ НА СЖАТИЕ ПРИ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

S.N. Yakovlev

CALCULATION OF POLYURETHANE DETAILS WHICH ARE WORKING ON SHRINKAGE UNDER STATIC LOAD

Получена эмпирическая зависимость для определения деформативности цилиндрических образцов произвольной формы с различными краевыми эффектами. Приведены значения допускаемых напряжений сжатия для различных видов нагружения — статического, разового динамического и постоянного динамического.

ПОЛИУРЕТАН; КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ; КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ; УСТОЙЧИВОСТЬ; ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ; ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СЖАТИЯ.

Empirical dependence for determination of deformation of cylindrical specimen with derived form and different edge effects is given. Values of allowable stress of shrinkage for static, single dynamic and constant dynamic loading are presented.

POLYURETHANE; EDGE EFFECT; FORM COEFFICIENT; STABILITY; CONSTRUCTION IDENTITY; ALLOWABLE STRESS OF SHRINKAGE.

Начиная с середины прошлого века в передовых промышленно развитых странах резина во многих технических приложениях стала вытесняться полиуретанами, имеющими важные конструктивные, технологические и эксплуатационные преимущества [1–3].

В числе главных задач конструирования деталей машин — как известно, определение таких размеров, при которых они были бы прочны и экономичны. Требования прочности и экономичности деталей в известном смысле противостоят друг другу, так как обеспечение прочности требует увеличения размеров деталей, а это приводит к увеличению их стоимости и снижению экономичности конструкции. Поэтому важнейшая задача расчета деталей машин — определить оптимальные размеры детали, при которых обеспечены условия прочности без излишних запасов, т. е. соблюдены условия экономии.

Помимо прочности, к деталям машин предъявляется требование длительной работоспособности и высокой надежности под действием приложенных нагрузок. Это требование особенно важно для деталей из полиуретана, работа которых обычно происходит при значительных статических и динамических нагрузках, вызывающих большие деформации. Сохранение деталями первоначальных размеров, формы и упругих характеристик приобретает в этих условиях первостепенное значение.

Детали машин должны быть совершенной формы, которая обеспечивает наиболее высокую технологичность их производства и монтажа. Они должны иметь минимальный вес и быть изготовленными из наименее дорогих материалов.

Перечисленные основные требования к деталям машин могут быть удовлетворены только при наличии методики расчета, основанной на

достоверном учете физико-механических свойств материала, величины и характера действующей нагрузки.

Методика исследования и материалы

Нагрузки, действующие на детали машин в процессе работы, можно разделить на статические и динамические.

Расчет деталей машин, работающих при статических нагрузках, в силу специфических свойств полиуретана как материала, обладающего значительным внутренним сопротивлением, существенно отличается от расчета деталей, работающих при динамических нагрузках. Это отличие заключается прежде всего в том, что полиуретановые детали вследствие высокой эластичности материала могут допускать значительные относительные деформации, достигающие в отдельных случаях 100 %, с полным восстановлением после этого геометрической формы и размеров, если прикладываемая нагрузка имеет статический, медленно изменяющийся характер или если динамическая нагрузка носит разовый характер, когда динамические нагружения следуют одно за другим с известными перерывами по времени.

Сжатие — основной вид деформации, при которой работает большинство полиуретановых и полиуретано-металлических деталей машин. При этом они, как правило, имеют цилиндрическую, прямоугольную или — значительно реже — коническую форму.

Расчет деталей машин, работающих на сжатие, заключается в определении зависимости деформации детали от приложенной нагрузки.

Теоретически строгое и точное решение задачи по определению характеристик упругости полиуретановых деталей машин, работающих на сжатие, можно получить методами теории упругости. Классическая линейная теория упругости разрабатывалась преимущественно для материалов, допускающих большие напряжения при малых деформациях, в основном для металлов. При этом, наряду с другими гипотезами, в линейной теории упругости в качестве исходных гипотез принимаются две следующие: между деформациями и напряжениями существует линейная зависимость; относительные деформации в материале пренебрежимо малы по сравнению с единицей.

В задачах о нагружении и деформациях полиуретана относительные деформации нельзя считать пренебрежимо малыми по сравнению с единицей; во многих случаях нельзя также считать линейной зависимость между деформациями и напряжениями. Для строгого аналитического решения задачи о нагружении и деформации необходимо использовать методы нелинейной теории упругости. Эти методы несравнимо сложнее методов линейной теории упругости и разработаны на сегодняшний день совершенно недостаточно.

В дальнейшем нам необходимо предложить достаточно простые приближенные формулы для инженерных расчетов полиуретановых деталей при статическом сжатии, которые давали бы результаты, согласующиеся с экспериментальными данными.

Основным физико-механическим параметром, определяющим деформативности полиуретановых деталей как при статическом, так и динамическом нагружении, является согласно [4, 5] модуль упругости. В отличие от металлов, для которых модуль упругости почти не изменяется, модуль упругости полиуретана при сжатии зависит от формы, размеров и сложного напряженного состояния полиуретанового массива.

Полиуретан как эластомер при испытаниях на сжатие показывает линейную зависимость между напряжением и деформацией в весьма небольших пределах начальных деформаций.

В целом у полиуретана зависимость «напряжение — деформация» нелинейная [6–9] и обычно не монотонна. Следовательно, не подчиняющийся закону Гука полиуретан нельзя охарактеризовать одним постоянным значением модуля упругости при сжатии, рассчитываемым как отношение напряжения к деформации. На нелинейном участке модуль упругости материала можно определить в дифференциальной форме как отношение приращения нагрузки к приращению деформации.

Для изучения вопросов деформативности полиуретановых образцов цилиндрической формы было спроектировано и изготовлено устройство (рис. 1), позволяющее производить нагружение образцов в заранее обозначенной области деформирования (до 25 %).

При проектировании нагружающего устройства необходимо было сделать выбор между на-

гружением с помощью пружин или с использованием силы тяжести от подвешенных грузов. Учитывая тот факт, что пружины не всегда надежны и в номинальную нагрузку легко вносятся погрешности, в частности из-за влияния температуры, было решено нагружение полиуретановых образцов или роликов производить с использованием силы тяжести от подвешенных грузов.

Для минимизации погрешности нагружения было произведено экспериментальное определение центра тяжести рычага в сборе с подвесом. Эти данные о рычажной системе были использованы для построения тарировочной диаграммы, устанавливающей соответствие между величиной груза, помещенного на подвес, и нагрузкой, приложенной к образцу.

Для экспериментального исследования использовались образцы из полиуретана торговой марки «Дуотан» (Duothane) фирмы Synair (США) и СІЛ (Великобритания) диаметром 16, 18 и 20 мм, высотой от 5 до 25 мм, трех твердостей — 65, 75 и 85 ShA.

При сжатии полиуретана площадь контакта детали с опорными плитами увеличивается по мере роста снижающей нагрузки и уменьшения высоты детали. Сила трения между торцами полиуретана и плитами столь значительна, что делает невозможным расширение торцов. Вследствие того, что площадь торцов остается неизменной, часть боковой поверхности полиуретана приходит в соприкосновение с плитами.

Описанное явление, связанное с влиянием торцов, или так называемым краевым эффектом, приводит к ужесточению полиуретановых деталей при сжатии. Если соприкасающиеся поверхности полиуретана и металла — гладкие и покрыты слоем смазки, то эффект торцов будет отсутствовать. При подобных условиях происходит определение модуля упругости при сжатии согласно ГОСТ 9550—81. Очевидно, влияние эффекта торцов будет максимальным при полимеризации полиуретана к металлическим плитам.

При наличии эффекта торцов деформация полиуретанового элемента характеризуется некоторым условным модулем упругости $E_{изд}$, присущим не материалу, а рассматриваемому изделию.

Для учета краевого эффекта были проведены эксперименты с тремя различными условиями взаимодействия полиуретана и сжимающих пла-

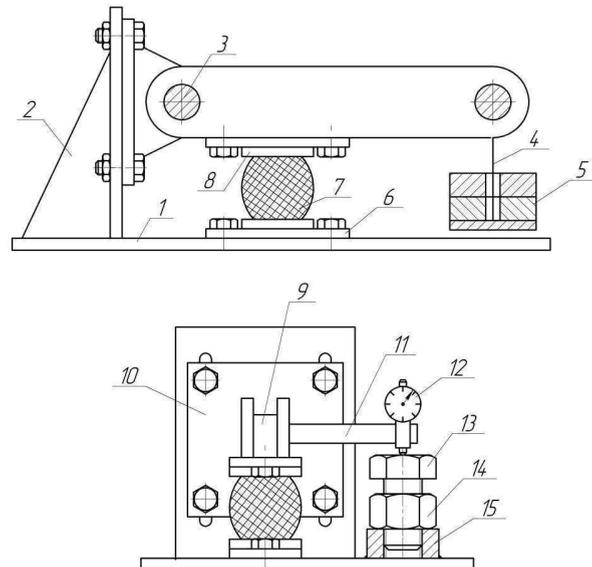


Рис. 1. Нагружающее устройство:

1 — основание; 2 — стойка; 3 — ось; 4 — подвес; 5 — груз; 6 — нижняя плита; 7 — образец; 8 — верхняя плита; 9 — рычаг; 10 — кронштейн; 11 — кронштейн индикатора; 12 — индикатор; 13 — винт; 14 — контргайка; 15 — бобышка

стин, наиболее часто встречающимися в реальных конструкциях:

- 1) деформация полиуретанового образца между гладкими, смазанными стальными плитами;
- 2) деформация полиуретанового образца между стальными плитами с шероховатостью Ra 1,25.
- 3) деформация полиуретанового образца с закрепленными торцами, когда полиуретан и опорные пластины полимеризуются в литевой форме.

По результатам экспериментов сделаны следующие выводы:

1. При смазанных торцах модуль упругости изделия $E_{изд}$ будет совпадать с модулем упругости полиуретана, и коэффициент, учитывающий трение на торцах, $K_{тор} = 1$.

2. В случае трения полиуретана по стальным пластинам с шероховатостью Ra 1,25 происходит незначительное ужесточение образца, которое можно учесть коэффициентом $K_{тор Ra 1,25} = 1,05$.

3. При закрепленных торцах, когда полиуретан и стальные пластины полимеризуются в литевой форме, $K_{тор полим} = 1,1$.

Как видим, влияние эффекта торцов на деформативность полиуретанового образца колеблется в узких пределах.

Большее влияние на жесткость изделия оказывает соотношение между размерами образца. Как известно, с уменьшением высоты жесткость образца возрастает. Физический смысл увеличения жесткости изделия заключается в постепенном переходе от высокоэластичной деформации сжатия к практически полной упругой объемной деформации полиуретана, модуль которой на три порядка выше, чем модуль одноосного сжатия. Это ужесточение для эластомеров принято оценивать так называемым фактором формы Φ — отношением площади нагруженной поверхности к свободной площади. Для цилиндрических образцов фактор формы согласно [7] равен

$$\Phi = D/4H, \quad (1)$$

где D — диаметр цилиндра, мм; H — высота цилиндра, мм.

Коэффициент формы для цилиндрических полиуретановых образцов по результатам большого количества замеров деформативности определяется согласно [7] по формуле

$$K_{\text{фор}} = (0,8 + \Phi), \quad (2)$$

где Φ — фактор формы.

Попутно заметим, что фактор формы стандартных образцов для определения модуля упругости при сжатии по ГОСТ 9550–81 равен 0,2 (диаметр 32 мм и высота 38 мм), и тогда коэффициент формы стандартного образца равен $K_{\text{фор}} = 0,8 + 0,2 = 1$.

На основании зависимости (2) определяется начальный, или исходный, модуль упругости при сжатии для цилиндрического образца произвольной формы. Например, при уменьшении высоты образца в 2 раза коэффициент формы $K_{\text{ф}} = 1,2$ и модуль упругости E для полиуретана твердостью 85 ShA возрастает с 21 до 25,2 МПа.

Для цилиндрической детали, имеющей осевое отверстие диаметром d , фактор формы записывается следующим образом:

$$\Phi = \frac{\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}}{\pi DH - \pi dH} = \frac{D-d}{4H}. \quad (3)$$

Для деталей прямоугольной формы фактор Φ имеет следующий вид:

$$\Phi = \frac{ab}{2(a+b)H}, \quad (4)$$

где a и b — стороны основания детали, мм; H — высота прямоугольника, мм.

Результаты исследования и их обсуждение

В отличие от резин, у которых согласно [10] деформативность не зависит от твердости, полиуретаны разной твердости имеют различные величины ужесточения при сжатии. Твердые полиуретаны ужесточаются при сжатии больше, нежели мягкие. По результатам большого количества (двести) замеров деформативности полиуретанов различной твердости получено выражение для коэффициента деформативности при сжатии:

$$K_{\text{дефор}} = \left(1 + \frac{\text{ShA}^{1,17}}{1000} \right). \quad (5)$$

Учитывая все изложенное, можно определить модуль упругости полиуретана при сжатии в изделии по следующей формуле:

$$E_{\text{изд}} = E_{\text{сто}} K_{\text{тор}} K_{\text{фор}} K_{\text{деф}} = E_{\text{сто}} K_{\text{тор}} (0,8 + \Phi) \left(1 + \frac{\text{ShA}^{1,17}}{1000} \right), \quad (6)$$

где $E_{\text{сто}}$ — начальный модуль упругости полиуретана при сжатии, МПа; $K_{\text{тор}}$ — коэффициент, учитывающий трение на торцах изделия; Φ — фактор формы изделия; ShA — твердость полиуретана по Шору.

Для случая осевого сжатия цилиндрического образца при малых деформациях (менее 25 %) зависимость «сила — деформации» может быть представлена в следующем виде:

$$F = \frac{\beta_1 E_{\text{изд}} S \delta}{H}, \quad (7)$$

где β_1 — коэффициент ужесточения при сжатии цилиндра; $E_{\text{изд}}$ — модуль упругости полиуретана при сжатии в изделии, МПа; S — площадь сечения, мм²; δ — осадка, мм; H — высота, мм.

Коэффициент β_1 является функцией безразмерного параметра $\gamma = r/H$, характеризующего отношение радиуса цилиндра к высоте. По результатам большого количества замеров деформативности полиуретановых цилиндров различной геометрии была получена экспериментальная зависимость, представленная на рис. 2.

Эта зависимость хорошо аппроксимируется следующим выражением:

$$\beta_1 = 0,73 + 0,46\gamma^2. \quad (8)$$

Качественно подобную зависимость для резин получил Э.Э. Лавендел [11, 12] с использованием метода разрешающей функции.

Для определения жесткости сплошного цилиндра при осевом сжатии для $\gamma = 0,5-4,5$ можно рекомендовать формулу

$$C = \frac{E_{\text{изд}}S}{H} \beta_1 = \frac{E_{\text{изд}}S}{H} (0,73 + 0,46\gamma^2). \quad (9)$$

Осадку цилиндра можно определить по формуле

$$\delta = \frac{FH}{\beta_1 E_{\text{изд}}S} = \frac{FH}{E_{\text{изд}}S (0,73 + 0,46\gamma^2)}. \quad (10)$$

Выводы и рекомендации

Исходя из опыта расчетов, изготовления и эксплуатации полиуретановых деталей, работающих на сжатие, можно рекомендовать в качестве допускаемых относительных деформаций следующие величины:

для деталей, испытывающих только статическую нагрузку, — $[\varepsilon] = 0,20-0,25$;

для деталей, испытывающих статическую нагрузку со случайными или регулярными кратковременными динамическими нагрузками, следующими с интервалом по времени, — $[\varepsilon] = 0,15-0,20$;

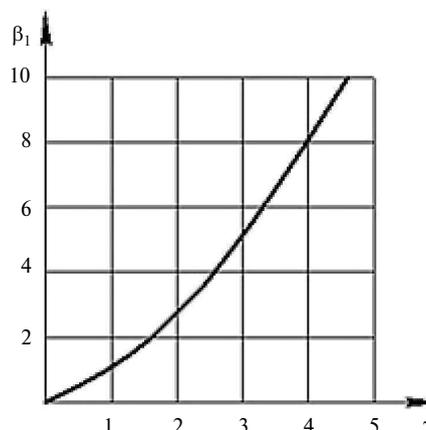


Рис. 2. Зависимость коэффициент β_1 от параметра γ

$$[\sigma_{\text{сж}}] = E_{\text{ст0}} [\varepsilon].$$

При выборе $[\varepsilon]$ в указанных пределах более высокие значения необходимо принимать для более мягких полиуретанов, а меньшие — для твердых полиуретанов. Величина допускаемых напряжений сжатия для полиуретановых деталей приведена в таблице.

Допускаемые напряжения сжатия для различных видов нагружения

| Твердость по Шору, ShA | Начальный статический модуль упругости при сжатии, МПа | Допускаемые напряжения сжатия, МПа | | |
|------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------------|
| | | при относительных нагрузках | при статическом нагружении с эпизодическими нагрузками | при постоянных динамических нагрузках |
| 75±1 | 15 | 3,7 | 3,0 | 2,2 |
| 85±1 | 21 | 4,6 | 3,5 | 2,5 |
| 95±1 | 35 | 7,0 | 5,2 | 3,5 |

для деталей, испытывающих постоянные динамические нагрузки, — $[\varepsilon] = 0,10-0,15$.

Учитывая незначительное (до 8 %) отклонение поведения полиуретана при сжатии от закона Гука и принимая выработанные практикой допускаемые относительные деформации в качестве основы расчета, допускаемое напряжение сжатия можно определить по формуле

Приведенные величины допускаемых напряжений могут быть рекомендованы для предварительной оценки прочности полиуретановых деталей. Окончательное суждение о прочности и долговечности полиуретановых деталей может быть получено лишь после испытаний их в эксплуатационных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Datta J.** Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers // Journal of Elastomers and Plastics. 2010. Vol. 42. P. 117–127.

2. **Maity M.** Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent // Journal of Elastomers and Plastics. 2001. Vol. 33. P. 211–224.

3. **Marcos F.M. Pacheco.** Thermal, Chemical and Morphological Characterization of Microcellular Polyurethane Elastomers // *Journal of Elastomers and Plastics*. 2009. Vol. 41. P. 323–338.

4. **Гуль, В.Е.** Прочность полимеров. М.: Химия, 1964. 280 с.

5. **Гуревич Л.Б.** Механика полимеров. М.: Химия, 1974. 283 с.

6. **Бидерман, В.Л.** Вопросы расчета резиновых деталей // *Расчеты на прочность*. 1958. №3. С. 25–41.

7. **Григорьев Е.Т.** Расчет и конструирование резиновых амортизаторов. М.: Машгиз, 1960. 164 с.

8. **Райт П., Камминг А.** Полиуретановые эласто-

меры. М.: Химия, 1973. 304 с.

9. **Payn A.P.** Sythesis and Classification of Polyurethane Elastomers // *Engineer*. 2008. № 40. P. 161–177.

10. **Горелик Б.М., Бухина М.Ф., Ратнер А.В.** Изменение площади контакта при деформации резиновых цилиндров и колец // *Каучук и резина*. 1961. № 3. С. 21–26.

11. **Лавендел Э.Э.** Расчет резинотехнических изделий. М.: Машиностроение, 1976. 232 с.

12. **Лавендел Э.Э.** Расчет цилиндрических резинотехнических амортизаторов сжатия // *Известия АН Латвийской ССР*. 1960. № 4. С. 153–158.

REFERENCES

1. **Datta J.** Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*. March 2010. Vol. 42. P. 117–127.

2. **Maity M.** Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent. *Journal of Elastomers and Plastics*. July 2001. Vol. 33. P. 211–224.

3. **Marcos F.M. Pacheco.** Thermal, Chemical and Morphological Characterization of Microcellular Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*. July 2009. Vol. 41. P. 323–338.

4. **Gul', V.E.** Prochnost' polimerov. M.: Khimiia, 1964. 280 s. (rus.)

5. **Gurevich, L.B.** Mekhanika polimerov. M.: Khimiia, 1974. 283 s. (rus.)

6. **Biderman V.L.** Voprosy rascheta rezinovykh detalei.

Raschety na prochnost'. 1958. №3. S. 25–41. (rus.)

7. **Grigor'ev E.T.** Raschet i konstruirovanie rezinovykh amortizatorov. M.: Mashgiz, 1960. 164 s. (rus.)

8. **Rait P., Kamming A.** Poliuretanye elastomery. M.: Khimiia, 1973. 304 s.

9. **Payn A.P.** Sythesis and Classification of Polyurethane Elastomers. *Engineer*. 2008. №40. P. 161–177.

10. **Gorelik B.M., Bukhina M.F., Ratner A.V.** Izmenenie ploshchadi kontakta pri deformatsii rezinovykh tsilindrov i kolets. *Kauchuk i rezina*. 1961. № 3. S. 21–26. (rus.)

11. **Lavendel E.E.** Raschet rezinotekhnicheskikh izdelii. M.: Mashinostroenie, 1976. 232 s. (rus.)

12. **Lavendel E.E.** Raschet tsilindricheskikh rezinometallicheskh amortizatorov szhatiya. *Izvestiia AN Latviiskoi SSR*. 1960. № 4. S. 153–158.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЯКОВЛЕВ Станислав Николаевич — доцент кафедры автоматизации технологических комплексов и процессов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: stannik59@mail.ru.

AUTHOR

YAKOVLEV Stanislav N. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya Str., St. Petersburg, Russia, 195251; e-mail: stannik59@mail.ru.



УДК 620.254.3

В.Л. Мазурин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ АМОРТИЗАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ НА СДВИГ

V.L. Mazurin

STATIC DEFORMATION DETERMINATION OF POLYURETHANE DAMPER WORKING ON SHEAR STRAIN

В статье приведены эмпирическая зависимость для определения деформации амортизатора в форме параллелепипеда и значения допускаемых напряжений сдвига для различных видов нагружения, а также эмпирическая зависимость от фактора формы деформации полиуретанового массива для полиуретанов различной твердости.

АМОРТИЗАТОРЫ СДВИГА; КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ; ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА; СТАТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ АМОРТИЗАТОРА; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.

Empirical dependence for determination of polyurethane damper with parallelepiped form and values of tolerable shear strain for different types of load are presented. Empirical dependence for determination of polyurethane massif deformation depending on form-factor for polyurethane with different hardness is also given.

SHEAR STRAIN DAMPER; FORM FACTOR; TOLERABLE SHEAR STRAIN; STATIC DEFORMATION OF DAMPER; EXPERIMENTAL STAND.

В современном машиностроении очень актуален вопрос замены традиционного эластомера — резины — на более совершенный современный материал — полиуретан — с целью улучшения конструктивных, технологических и эксплуатационных качеств деталей.

Перспективность полиуретанов для современной промышленности обусловлена тем, что их свойства существенно дополняют возможности использования других эластомеров, каучуков, резин и пр. По своим конструкционным и технологическим возможностям полиуретаны — наиболее универсальный полимерный материал. Полиуретан имеет высокие физико-механические свойства, большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокую прочность, высокое сопротивление раздиру, маслостойкость, кислотостойкость и рабочий температурный интервал от -35 до $+75$ °C [1–3].

С помощью амортизаторов достигается значительное уменьшение динамических усилий и тем самым предупреждается возникновение

усталостных поломок, т. е. увеличивается долговечность машин.

При конструировании полиуретановых амортизаторов следует учитывать тот факт, что степень деформации полиуретана существенно зависит от вида нагружения. Наибольшие деформации бывают при нагрузках, вызывающих сдвиг полиуретана, наименьшие — при нагрузках, вызывающих сжатие. В следствие этого амортизаторы сдвига обладают сравнительно небольшой грузоподъемностью, но большой гибкостью. Расчет полиуретановых амортизаторов заключается в определении зависимости между величиной нагрузки и соответствующей деформацией амортизатора.

Полиуретановые детали, работающие на сдвиг [4–5], имеют различную форму, но наиболее часто применяются детали в виде цилиндров или параллелепипедов. Нагрузка прикладывается обычно к двум параллельным металлическим пластинам, между которыми находится полиуретановый массив.

Под действием сдвигающей силы F (рис. 1, а) полиуретановый элемент испытывает не только сдвиг, но и изгиб, вследствие чего в нем, наряду с касательными, возникают и нормальные напряжения.

При деформации параллельность сторон полиуретанового элемента, связанных с металлическими пластинами, нарушается. В производственной практике для исключения перекоса применяются детали, состоящие из двух полиуретановых массивов (рис. 1, б). Если сдвигающая сила прикладывается к средней пластине, а при этом наружные пластины закреплены неподвижно, то полиуретановый элемент испытывает [11] так называемый сложный сдвиг, а по их краям действуют касательные напряжения и незначительные нормальные. Изготавливают амортизаторы методом свободного литья предварительно нагретых исходных компонентов полиуретана в открытую форму. Затем производится полимеризация эластомерно-металлической детали в печи при температуре примерно $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении 12 часов. Крепление полиуретанового массива к средней и наружной пластинам производят через слой адгезива, который наносят на металл и перед заливкой предварительно просушивают.

Если исходить из равномерного распределения касательных напряжений (погрешность $\pm 7\%$) по плоскости сдвига, то связь между напряжением и силой выражается, как известно, следующей формулой:

$$\tau = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где F — нагрузка, приложенная к детали, Н; S — площадь плоского сдвига, мм^2 .

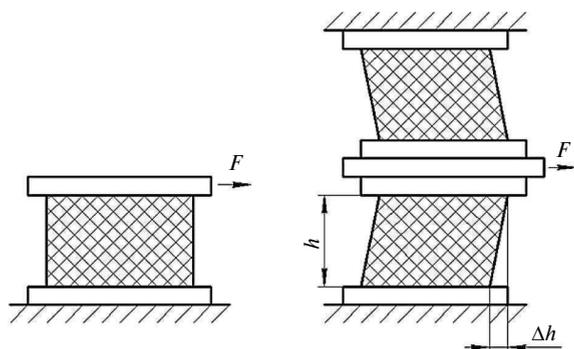


Рис. 1. Полиуретаново-металлические детали, работающие на сдвиг:

а — единичный блок; б — двоянный блок

Деформация Δh (рис. 1, б) называется абсолютным сдвигом, а отношение $\gamma = \Delta h/H$ — относительным сдвигом [11].

Как показывают многочисленные исследования, относительный сдвиг γ и касательное напряжение τ пропорциональны друг другу и связаны между собой законом Гука, согласно которому

$$\tau = G\gamma. \quad (2)$$

В теории упругости установлены следующие зависимости:

$$K = E/3(1 - 2\mu), \quad (3)$$

$$G = E/2(1 + \mu), \quad (4)$$

где K — объемный модуль упругости, МПа; μ — коэффициент Пуассона.

Из этих формул легко получить

$$\mu = (3K - 2G) / 2(3RK - G); \quad (5)$$

$$E = 9KG / (3K + G). \quad (6)$$

Согласно [12] у полиуретана твердостью 85 ShA $K \approx 2720$ МПа, а $G \leq 7$ МПа. Поэтому, если в числителе выражения (5) и в знаменателе выражения (6) пренебречь величинами $2G$ и G , которые весьма малы по сравнению с величиной $3K$, то погрешность не будет превышать $0,1\%$. При этом из формулы (6) следует зависимость

$$E = 3G. \quad (7)$$

Следует отметить, что согласно [13] уравнение (7) справедливо для деформации чистого сжатия. Таким образом, даже в этом случае податливость детали на сдвиг в 3 раза больше, чем на сжатие. Если же принять во внимание тот факт, что модуль сжатия изделия согласно [10] в значительной степени зависит от формы и размеров детали, то эта зависимость будет выражена более ярко.

Расчет полиуретановых деталей, работающих на сдвиг, значительно проще, чем расчет деталей, испытывающих деформацию сжатия. Объясняется это тем, что модуль сдвига полиуретана в пределах практически наблюдаемых деформаций полиуретановых деталей может приниматься постоянным независимым от величины деформации.

Однако модуль сдвига полиуретана, как и модуль сжатия, зависит от соотношения геометрических размеров детали, или согласно [10] от так называемого фактора формы.

Материалы и методика исследования

Для экспериментального исследования использовался полиуретан торговой марки «Дуотан» (Duothane) фирм Synair (США) и CIL (Великобритания) трех твердостей — 65S, 75 и 85 ShA.

При проектировании нагружающего устройства необходимо было сделать выбор: нагружать с помощью пружин или с использованием силы тяжести от подвешенных грузов. Учитывая тот факт, что пружины не всегда надежны и в номинальную нагрузку легко вносятся погрешности, в частности из-за влияния температуры, было решено нагружение полиуретановых амортизаторов производить с использованием силы тяжести от подвешенных грузов.

Для минимизации погрешности нагружения было произведено экспериментальное определение центра тяжести рычага в сборе с подвесом. Эти данные о рычажной системе были использованы для построения тарировочной диаграммы (погрешность $\pm 7\%$), устанавливающей соответствие между величиной груза, помещенного на подвес, и нагрузкой, приложенной к амортизатору.

Результаты исследования и их обсуждение

Сменный упор 9 позволяет устанавливать амортизаторы с различной высотой полиуретанового массива H и поперечными размерами a и b . Перечисленные размеры определяют фактор формы Φ амортизатора — отношение площади нагруженной поверхности к свободной площади. Для деталей прямоугольной формы фактор формы Φ выражается согласно [11]

$$\Phi = \frac{ab}{2(a+b)H}, \quad (8)$$

где a и b — стороны основания полиуретанового массива, мм; H — высота массива, мм.

Замер деформации амортизатора производился с помощью стрелочного индикатора с ценой деления 0,01 мм по 15 уровням нагружения согласно тарировочной диаграмме. При замерах деформации использовались амортизаторы с различными факторами формы, которые определяются высотой и поперечными размерами полиуретанового массива.

По результатам экспериментальных замеров было получено выражение для определения модуля сдвига изделия в зависимости от фактора формы:

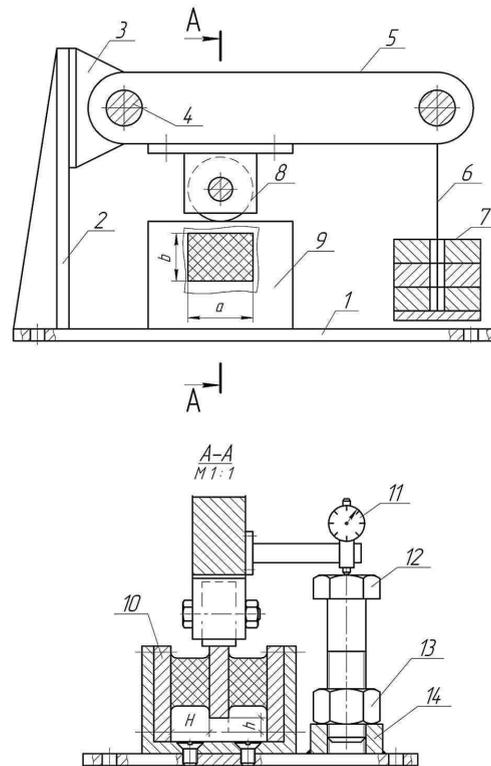


Рис. 2. Нагружающее устройство:

1 — основание; 2 — стойка; 3 — кронштейн; 4 — ось; 5 — рычаг; 6 — подвес; 7 — груз; 8 — подшипник качения; 9 — упор; 10 — амортизатор; 11 — индикатор; 12 — регулируемый упор; 13 — контргайка; 14 — бобышка

$$G_{\text{изд}} = \frac{G_{\text{сд}}}{1 + \frac{1}{28\Phi^2}}, \quad (9)$$

где $G_{\text{сд}}$ — модуль сдвига полиуретана, МПа; Φ — фактор формы.

Аналогичное выражение приведено в работе [6] для резин.

Как следует из формулы (9), с увеличением высоты детали при неизменном поперечном размере, т. е. с уменьшением фактора формы, уменьшается и модуль упругости изделия $G_{\text{изд}}$. Это объясняется тем, что с увеличением высоты детали ее деформация происходит не только за счет сдвига, но и за счет поперечного изгиба.

Для экспериментальных замеров деформации использовались амортизаторы с твердостью полиуретанового массива 65, 75, 85 ShA.

Из эксперимента следует небольшое различие в деформативности полиуретанов различной твердости. Мягкие полиуретаны более склонны

к поперечному изгибу, нежели твердые. Это явление будем учитывать коэффициентом деформативности при сдвиге

$$K_{\text{деф сд}} = 0,5 + 0,0052 \text{ ShA}. \quad (10)$$

Аналогичные зависимости приведены в работах [7, 8].

Окончательно для определения модуля сдвига изделия имеем выражение

$$G_{\text{изд}} = \frac{G_{\text{сд}}}{1 + \frac{1}{28\Phi^2}} (0,5 + 0,0052 \text{ ShA}). \quad (11)$$

При проведении инженерных расчетов полиуретановых деталей на сдвиг зависимость между напряжениями и деформацией может приниматься линейной до значительных величин γ , равных 0,6–0,7. Однако график $G(\gamma)$ показывает незначительное снижение модуля сдвига с увеличением деформации (рис. 3)

Незначительное снижение модуля упругости при сдвиге можно не учитывать при обычных инженерных расчетах. При этом ошибка в определении жесткости деталей в пределах статического сдвига $\gamma = 0,3–0,4$ не превышает 2–5 % для полиуретана твердостью 75–85 ShA.

Замеры деформативности полиуретана при сдвиге показали характерное соответствие между модулем упругости при сжатии и модулем упругости при сдвиге, описываемое зависимостью (7). В соответствии с экспериментальными замерами можно принимать модуль сдвига рав-

ным одной трети от начального модуля упругости при сжатии:

$$G = 1/3E, \quad (12)$$

где E — модуль упругости при сжатии, МПа.

С учетом линейной зависимости $F(\gamma)$ и постоянства модуля сдвига определение деформации полиуретановых деталей может производиться на основе зависимости, вытекающей из закона Гука, как это следует из рис.1 и соотношений (1) и (2):

$$\Delta h = \gamma H = \frac{FH}{G_{\text{изд}} S}; \quad (13)$$

где F — нагрузка, приложенная к детали, Н; H — высота детали, мм; $G_{\text{изд}}$ — модуль упругости изделия, МПа определяемый по формуле (11); S — площадь поперечного сечения детали по плоскости сдвига, мм².

При выборе допустимых напряжений для полиуретановых деталей [9], работающих при статических нагрузках, которые вызывают деформацию сдвига, можно исходить из допустимых относительных деформаций, в пределах которых имеет место чистый сдвиг. Чистый сдвиг характеризуется наличием только касательных напряжений, при этом сохраняются форма и размеры поперечного сечения во всех плоскостях, параллельных плоскости сдвига.

Выводы и рекомендации по проектированию

Для полиуретанов, используемых для изготовления амортизаторов, эластичных шарниров и других аналогичных деталей, величина относительного сдвига может достигать максимальных величин $\gamma = 0,6–0,7$, как, например, у амортизаторов при пуске или остановке двигателя. Учитывая высокую стабильность физико-механических свойств полиуретана, прочность крепления полиуретанового массива к металлу при полимеризации, а также основываясь на опыте расчетов, изготовления и эксплуатации полиуретано-металлических деталей, можно рекомендовать в качестве допустимых относительных деформаций сдвига следующие величины:

для деталей, испытывающих только статическую нагрузку, — $[\gamma] = 0,5–0,6$;

для деталей, испытывающих статическую нагрузку со случайными или регулярными кратковременными динамическими нагрузками, следующими с интервалом по времени, — $[\gamma] = 0,35–0,45$;

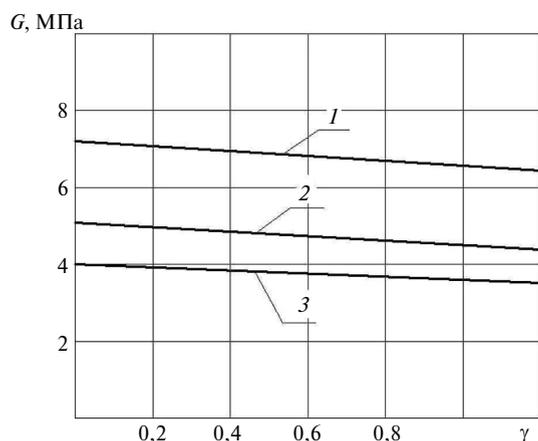


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига полиуретана от величины относительной деформации при твердости 85 (1); 75 (2) и 65 (3) ShA

для деталей, испытывающих постоянные динамические нагрузки, — $[\gamma] = 0,15-0,25$.

Величина относительных допустимых деформаций сдвига следует из экспериментальных замеров деформации полиуретанового массива (в частности до $\gamma = 0,5-0,6$ зависимость линейна), а также опыта расчетов, изготовления и эксплуатации полиуретано-металлических деталей.

Принимая указанные допустимые относительные деформации в качестве основы расчета и имея для полиуретана каждой твердости свой модуль упругости G , можно определить допустимое напряжение сдвига $[\tau]$ по формуле $[\tau] = G[\gamma]$.

При окончательном выборе γ в указанных выше пределах необходимо принимать более высокие значения γ для мягких высокоэластичных полиуретанов, а меньшие значения γ — для полиуретанов повышенной твердости. Исходя из указанных соображений величины допустимых напряжений, которые можно использовать при расчетах полиуретановых и полиуретано-металлических деталей, представлены в таблице.

Аналогичные качественно соотношения допустимых напряжений для резин приведены в работе [10].

Располагая величиной допустимого напряжения, проектирование полиуретановых деталей по заданной жесткости $C = \frac{GS}{H}$ можно производить в следующем порядке.

Исходя из опытов расчета и эксплуатации полиуретано-металлических деталей выбираем полиуретан определенной твердости, с помо-

щью приведенной выше таблицы принимаем допустимое напряжение, соответствующее характеру действующей нагрузки, и определяем относительную деформацию сдвига

$$\gamma = \frac{\tau}{G},$$

Далее исходя из конструктивных соображений принимаем либо площадь сечения детали в плоскости сдвига, либо высоту детали или ее абсолютный сдвиг. Если по конструктивным соображениям удобнее задаваться высотой детали или абсолютным сдвигом, то на основании зависимости $\gamma = \Delta h/H$ при известном относительном сдвиге определяем обе эти величины.

После того как станет известно H , определяем площадь плоскости сдвига по формуле $S = \frac{cH}{G}$ и далее, задаваясь одним из размеров a или b , находим второй из них. Рекомендуется принимать $a = b$ или $a = 2b$ (в последнем случае следует располагать полиуретано-металлическую деталь таким образом, чтобы сдвигающая сила была параллельна большей стороне основания).

Если из конструктивных соображений удобнее задаваться размерами основания a и b , т. е. площадью плоскости сдвига S , то сначала определяем абсолютный сдвиг детали по формуле $\Delta h = \frac{GS\gamma}{c}$, а затем — высоту как $H = \Delta h/\gamma$. Точно так же по заданной жесткости c можно определять размер детали произвольной формы, работающей на сдвиг.

Допустимые напряжения сдвига для различных видов полиуретанов

| Твердость полиуретана по Шору, ShA | Модуль сдвига, МПа | Допустимые касательные напряжения, МПа, в разных вариантах деформаций | | | | |
|------------------------------------|--------------------|---|--|---|--------------------|---------------------|
| | | Сдвиг при статической нагрузке | Сдвиг при статическом нагружении с эпизодическими динамическими нагрузками | Сдвиг при постоянных динамических нагрузках | Сдвиг с поворотом* | Сдвиг с кручением** |
| 65±1 | 4 | 2,4 | 1,8 | 1,0 | 1,3 | 1,1 |
| 75±1 | 5 | 2,8 | 2,0 | 1,0 | 1,4 | 1,2 |
| 85±1 | 7 | 3,5 | 2,4 | 1,0 | 1,5 | 1,3 |

Примечания: * сдвиг с поворотом характерен для работы сайлент-блока;

** сдвиг с кручением характерен для работы амортизаторов-шайб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Datta J.** Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers // *Journal of Elastomers and Plastics*. 2010. Vol. 42. P. 117–127.
2. **Maity M.** Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent, *Journal of Elastomers and Plastics*. 2001. Vol. 33. P. 211–224.
3. **Rek V.** Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters // *Journal of Elastomers and Plastics*. Octobre 2003. Vol. 35. P. 311–323.
4. **Аношин Г.В., Державец Ю.А., Сивчиков С.В., Яковлев С.Н.** Уточненный расчет напряженно-деформированного состояния колес с массивным упругим ободом методом конечного элемента // *Машиностроение и автоматизация производства: Межвузовский сб.* Вып. 15. СПб.: Изд-во СЗПИ, 1999. С. 35–40.
5. **Державец А.Ю., Яковлев С.Н.** Предотвращение автоколебаний при финишной обработке металло-эластомерных деталей. // *Сб.: Проблемы машиноведения и машиностроения*. СПб.: Изд-во СЗПИ, 2000. С. 27–32.
6. **Бартенев, Г.М., Зайцева В.Д.** О влиянии коэффициента формы на деформацию и морозостойкость резины // *Каучук и резина*. 1962. №12. С. 16–18.
7. **Zhang H.** Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers, *Journal of Elastomers and Plastics*, April 2008 40:161–177
8. **Rek V.** Kinetic Parameters Estimation for Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers // *Journal of Elastomers and Plastics*. 2006. Vol. 38. P. 105–118.
9. **Яковлев С.Н.** Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана. СПб.: Реноме, 2013. 176 с.: ил.
10. **Потураев В.Н.** Резиновые детали машин. М.: Машиностроение, 1966. 304с.
11. **Григорьев Е.Т.** Расчет и конструирование резиновых амортизаторов. М.: Mashgiz, 1960. 164 с.
12. **Райт П., Камминг А.** Полиуретановые эластомеры. М.: Химия, 1973. 304с.
13. **Огибалов Л.М.** Конструкционные полимеры. М.: Изд-во МГУ, 1972. 322 с.

REFERENCES

1. **Datta J.** Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*. March. 2010. Vol. 42. P. 117–127.
2. **Maity M.** Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent. *Journal of Elastomers and Plastics*. July 2001. Vol. 33. P. 211–224.
3. **Rek V.** Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters. *Journal of Elastomers and Plastics*. October. 2003. Vol. 35. P. 311–323.
4. **Anoshin G.V., Derzhavets Yu.A., Sivchikov S.V., Yakovlev S.N.** utochnenniy raschet napriazhenno-deformirovannogo sostoyaniia koles s massivnym uprugim obodom metodom konechnogo elementa. *Mashinostroenie i avtomatizatsiya proizvodstva. Mezhvuzovskiy sb.* Vyp. 15. SPb.: Izd-vo SZPI, 1999. S. 35–40. (rus.)
5. **Derzhavets A.Yu., Yakovlev S.N.** Predotvrashchenie avtokolebaniy pri finishnoy obrabotke metallo-elastomernykh detaley. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya.*— SPb.: Izd-vo SZPI, 2000. S. 27–32. (rus.)
6. **Bartenev G.M., Zaytseva V.D.** O vliianii koeffitsienta formy na deformatsiyu i morozostoikost' reziny. *Kauchuk i rezina*. 1962. №12. S. 16–18.
7. **Zhang H.** Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*. April 2008. Vol. 40. P. 161–177.
8. **Rek V.** Kinetic Parameters Estimation for Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*. April, 2006. Vol. 38. P. 105–118.
9. **Yakovlev S.N.** Proektirovanie i osnovy tekhnologii detaley mashin iz poliuretana. SPb.: Renome, 2013. 176 s.: il.
10. **Poturaev V.N.** Rezinovye detali mashin. М.: Mashinostroenie, 1966. 304 s. (rus.)
11. **Grigoryev Ye.T.** Raschet i konstruirovaniye rezinovykh amortizatorov. М.: Mashgiz, 1960. 164 s. (rus.)
12. **Rayt P. Kamming A.** Poliuretananovyye elastomery М.: Khimiya, 1973.— 304 s. (rus.)
13. **Ogibalov L.M.** Konstruktsionnyye polimery. М.: Izd-vo MGU, 1972. 322 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАЗУРИН Валерий Леонидович — аспирант кафедры автоматизации технологических комплексов и процессов института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: valmazurin@rambler.ru

AUTHOR

MAZURIN Valeriy L. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya St.; 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: valmazurin@rambler.ru



УДК 621.8

*С.А. Соколов, С.В. Краснова***РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ
ЕЗДОВЫХ БАЛОК С КАТАНИЕМ ПО НИЖНЕМУ ПОЯСУ***S.A. Sokolov, S.V. Krasnova***CALCULATION OF STRENGTH AND FATIGUE RESISTANCE
OF SLED RIDING BEAMS ON THE LOWER WAISTBAND**

Работа посвящена проверке и уточнению методики прогнозирования прочности и долговечности ездовых балок с катанием колес по нижнему поясу. Выполнено конечно-элементное исследование напряженного состояния ездового тавра на моделях с различными геометрическими параметрами при разных вариантах нагружения. Показано, что существующая методика расчета местных напряжений дает значительную погрешность не в запас надежности. Предложены новые формулы для вычисления параметров местного напряженного состояния, которые в большей степени соответствуют результатам численного эксперимента. Дана методика расчета ездовой балки на сопротивление усталости.

КРАН; СТАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ; МЕСТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ; ПРОЧНОСТЬ; СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ.

The purpose of this study is to review and improve the methods of predicting strength and fatigue life of I-beam with wheel loads on the bottom flange. The finite element analysis of the stress state of the bottom flange was conducted on models with various geometrical parameters and different types of loading. The study shows that the existing methods of local stress calculation induce significant errors. New equations have been suggested to determine parameters of local stress state that correspond more accurately to the results of numeric analysis. Fatigue assessment methods for I-beam with wheel loads on the bottom flange have been presented.

CRANE; STEEL CONSTRUCTION; LOCAL STRESSES; STRENGTH; FATIGUE.

В качестве путей для подвесных кранов и талей используются двутавровые балки, по нижним поясам которых движутся ходовые колеса. Как правило, эти конструкции используются для кранов с достаточно легким режимом работы (не выше А5). Простота и удобство этого конструктивного решения делает их привлекательными и для машин с более интенсивным режимом эксплуатации. Однако для этого необходима более надежная методика прогнозирования их работоспособности и долговечности.

Методики расчета этих балок на прочность с учетом местного воздействия нагрузки от ходовых колес приведены в работах [1, 3, 4]. Источники [1, 3, 4] содержат фактически одну и ту же методику, разработанную более 30 лет назад, но представляемую в несколько различных видах.

В нашей статье [2] была сделана попытка проверки этой методики на весьма ограниченном расчетном материале. В данной работе выполнена более обстоятельная проверка методик расчета ездовых балок этого типа, проанализировано взаимное влияние воздействия двух пар колес, катящихся по поясу, и сделаны предложения по совершенствованию расчета.

Для обеспечения работоспособности ездовой балки с катанием колес по нижнему тавру необходимо для трех его точек выполнить расчеты на прочность с учетом местных напряжений. Для этого используют теорию прочности Мизеса — Генки и, считая, что в симметричной задаче касательные напряжения вблизи плоскости симметрии малы, записывают условие прочности в главных напряжениях как

$$\sigma_{es} = \sqrt{(\sigma_M + \sigma_{xi})^2 + \sigma_{yi}^2} - (\sigma_M + \sigma_{xi})\sigma_{yi} \leq [\sigma].$$

Здесь $i = 1, 2, 3$ — номер расчетной точки (рис. 1, а, б); σ_M — нормальные напряжения от общего изгиба балки; при расположении тележки в пролете $\sigma_M > 0$, на консоли — $\sigma_M = 0$; σ_{xi}, σ_{yi} — компоненты местного напряженного состояния в расчетных точках; $[\sigma] = \sigma_T/n$ — допускаемое напряжение; σ_T — предел текучести стали; n — коэффициент запаса прочности. В расчетах на прочность с учетом местных напряжений можно использовать пониженный коэффициент запаса, так как эти напряжения в расчетной зоне имеют большой градиент.

Формулы для вычисления местных напряжений в i -й точке ездового тавра имеют вид [3]

$$\sigma_{xi} = k_{xi} \frac{F}{t_f^2}; \quad \sigma_{yi} = k_{yi} \frac{F}{t_f^2}, \quad (1)$$

где F — нагрузка, создаваемая одним ходовым колесом; t_f — толщина пояса; k_{xi}, k_{yi} — расчетные коэффициенты для каждой расчетной точки, зависящие от положения пятна контакта колеса с поясом.

По методике [3] коэффициенты вычисляются следующим образом.

Для пояса с параллельными гранями (рис. 1, б):

$$k_{x2} = 0,050 - 0,580\lambda + 0,148 \exp(3,015\lambda);$$

$$k_{x1} = -k_{x2};$$

$$k_{x3} = 2,230 - 1,490\lambda + 1,390 \exp(-18,33\lambda);$$

$$k_{x4} = 0,730 - 1,580\lambda + 2,910 \exp(-6,00\lambda);$$

$$k_{y2} = -2,110 + 1,977\lambda + 0,0076 \exp(6,530\lambda);$$

$$k_{y1} = -k_{y2};$$

$$k_{y3} = 10,108 - 7,408\lambda - 10,108 \exp(-1,364\lambda); \quad k_{y4} = 0.$$

Для пояса с непараллельными гранями (рис. 1, а):

$$k_{x2} = -0,981 - 1,479\lambda + 1,120 \exp(1,322\lambda);$$

$$k_{x1} = -k_{x2};$$

$$k_{x3} = 1,810 - 1,150\lambda + 1,060 \exp(-7,700\lambda);$$

$$k_{x4} = 1,990 - 2,810\lambda + 0,840 \exp(-4,690\lambda);$$

$$k_{y2} = -1,096 + 1,095\lambda + 0,192 \exp(-6,000\lambda);$$

$$k_{y1} = -k_{y2};$$

$$k_{y3} = 3,965 - 4,835\lambda - 3,965 \exp(-2,675\lambda); \quad k_{y4} = 0.$$

Здесь $\lambda = \frac{2e}{b-t_w}$ (см. рис. 1.). При расчете балки с непараллельными гранями полки в формулы

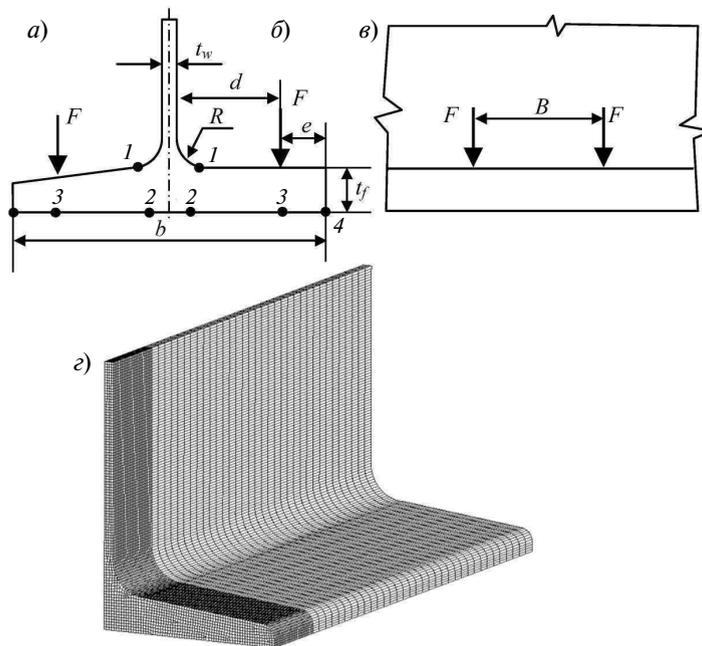


Рис. 1. Схема местного нагружения ездового тавра (а, б) и конечно-элементная модель Т4 (с)

(1) следует подставлять фактическую толщину пояса в точке приложения силы.

Исследование напряженно-деформированного состояния ездового тавра выполнено методом конечных элементов. Рассмотрены модели с галтельным переходом от пояса к стенке с радиусом и без такового, с поясами, имеющими параллельные грани и с наклонной гранью, расположенной с уклоном 0,1 (рис. 1, а, б; табл.). В моделях принято отношение $b/t_f = 10-20$. В этом диапазоне лежат геометрические параметры стандартных двутавров с узкими и широкими полками. Геометрия модели Т4 соответствовала двутавру №33 по [5], а модель Т3 — двутавру 40Ш1 по [6]. Расчет выполнялся в программе MSC Nastran с использованием элементов типа Solid (рис. 1, в). Нагружение пояса производилось по площадке размером 2×2 мм. Контактное взаимодействие не моделировалось, так как особенности напряженного состояния вблизи нагрузки мало влияют на напряжения в расчетных точках, а расчет зоны контакта хорошо изучен и представлен в инженерной-технической литературе [1, 7]. При анализе напряженного состояния пояса, загруженного одной парой колес, варьировалось положение точки контакта в диапазоне $\lambda = 0,05-0,75$. При моделировании нагружения двумя парами расстояние между осями B варьировалось в интервале от нуля до $3b$ (рис. 1, в).

При обработке результатов численных экспериментов находили напряжения в расчетных точках и вычисляли фактические значения коэффициентов по формулам, следующим из (1):

$$k_{xi} = \frac{\sigma_{xi} t_f^2}{F}; \quad k_{yi} = \frac{\sigma_{yi} t_f^2}{F}.$$

На модели Т1 с параллельными гранями полок эти коэффициенты вычисляли при значениях отношения b/t_f , равных 10, 13,3 и 20.

Выполненные расчеты показали, что структура формул (1) удовлетворительно отражает влияние абсолютного значения толщины пояса. Так, вариация отношения b/t_f в указанном диапазоне для наиболее значимых компонентов местного напряженного состояния приводит к отклонению значения коэффициентов k_{xi}, k_{yi} от среднего на $\pm 10\%$. При этом использование среднего значения коэффициента влечет за собой завышение расчетных напряжений для более толстых поясов и занижение для более тонких. Для расчета тавров с $b/t_f > 20$ следует проводить дополнительный анализ. В дальнейшем для анализа и сравнения с аналитическими решениями принимали средние значения коэффициентов в указанном диапазоне.

Сопоставление значений расчетных коэффициентов, полученных в результате численного эксперимента, с результатами вычисления по методике [3] приведено на рис. 2. В этих графиках наибольшее практическое значение имеет область $0,1 < \lambda < 0,4$, так как в области $\lambda < 0,1$ располагается закругление кромки пояса, а в зону $\lambda > 0,4$ точка контакта колеса с поясом обычно не попадает по конструктивным причинам. Напряжения в точке 4 во всех вариантах нагружения оказываются не больше, чем в точке 3, поэтому в дальнейших расчетах они не рассматриваются.

Методика [3] (штриховая линия на рисунках) для тавров с параллельными гранями полок дает удовлетворительную сходимость с результатами конечно-элементного расчета для напряжений в точке 3. В остальных случаях наблюдается существенное расхождение либо график оказывается вблизи нижней границы зоны разброса. Расчеты модели Т4 с непараллельными гранями полки по методике [3] также дали существенное расхождение с численным экспериментом

Геометрические параметры конечно-элементных моделей

| Параметры (см. рис. 1), ед. измер. | Значения параметров в четырех моделях | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-----|-----|-------|
| | Т1 | Т2 | Т3 | Т4 |
| t_f , мм | 10, 15, 20 | 18 | 14 | 11,2* |
| t_w , мм | 10 | 10 | 9,5 | 7 |
| b , мм | 200 | 150 | 300 | 140 |
| R , мм | 0 | 16 | 22 | 13 |
| Уклон полки, ° | 0 | 0 | 0 | 0,1 |

* Примечание: средняя толщина полки.

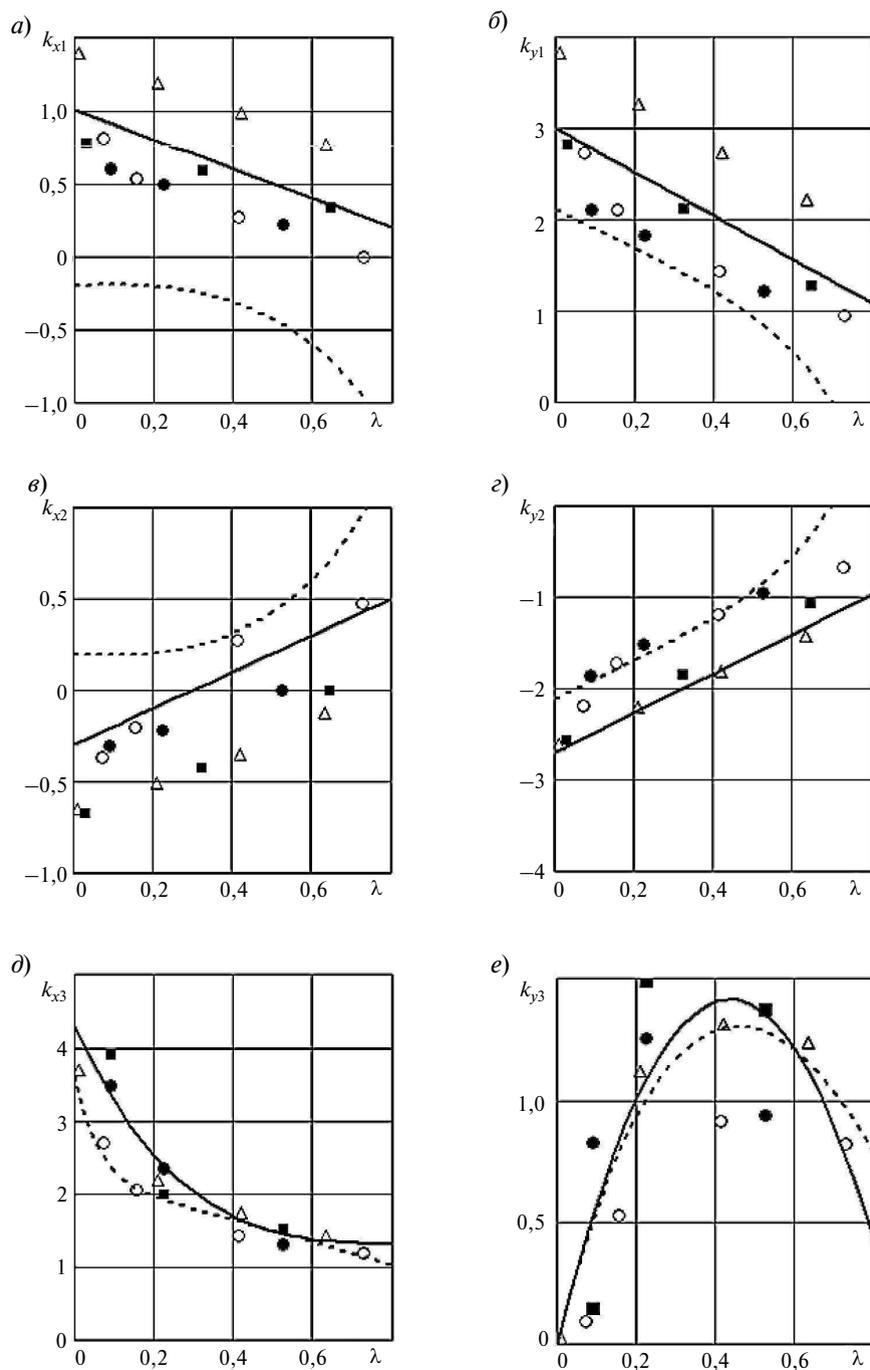


Рис. 2. Результаты конечно-элементного анализа напряженного состояния ездового тавра:

--- расчет по методике [3]; — расчет по (3) при $\eta_B = 1$;
 Δ — для модели T1, \circ — для T2, \blacksquare — для T3, \bullet — для T4

(на рис. 1 эти графики не показаны). В связи с этим результаты расчета для модели Т4 обработаны с использованием средней толщины полки. Как видно из представленных данных, в этом случае принципиальных расхождений между результатами численного расчета моделей с параллельными и непараллельными гранями полок нет.

Взаимное влияние местного воздействия от двух колес, движущихся по одной полке тавра, исследовано на модели Т1. Установлено, что напряжения в точках 1 и 2 зависят от расстояния между колесами B и возрастают при сближении колес. Результаты вычисления напряжений представлены в виде зависимости коэффициента $\eta_{Bi} = \frac{k_{Bi}}{k_i}$ от параметра $\beta = B/d$ (рис. 3). Здесь k_i, k_{Bi} — значения коэффициентов из выражения (1) для i -й точки при нагружении полки соответственно одним и двумя колесами; $d = 0,5(b - t_w) - e$ (рис. 1, а). По расположению точек, координаты которых вычислены по напряжениям $\sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \sigma_{y2}$, прослеживается убывающая зависимость, которая приближается к единице при $\beta = 2-3$. Она может быть аппроксимирована функцией (см. рис. 3)

$$\eta_B = 1 + \exp(-1,6\beta). \quad (2)$$

Таким образом при катании колеса на расстоянии $e = 0,1b$ от кромки пояса взаимное влияние можно не учитывать, если расстояние между колесами B будет не меньше b . В инженерных расчетах коэффициент η_B можно вычислять так:

$$\eta_B = 1 + \exp\left(-3,2 \frac{B}{b}\right).$$

Напряжения σ_{x2} и в точке 3 практически не зависят от расстояния между колесами.

На основании анализа полученных данных предлагаем для вычисления местных напряжений в полке ездового тавра как с параллельными, так и с наклонными гранями использовать формулы (1) со следующими коэффициентами:

$$\begin{aligned} k_{x1} &= (1-\lambda)\eta_B; & k_{y1} &= 3(1-0,8\lambda)\eta_B; \\ k_{x2} &= -0,3+\lambda; & k_{y2} &= -2,7(1-0,8\lambda)\eta_B; \\ k_{x3} &= 1,3+3(1-\lambda)^4; & k_{y3} &= 6,5\lambda(1-1,15\lambda). \end{aligned} \quad (3)$$

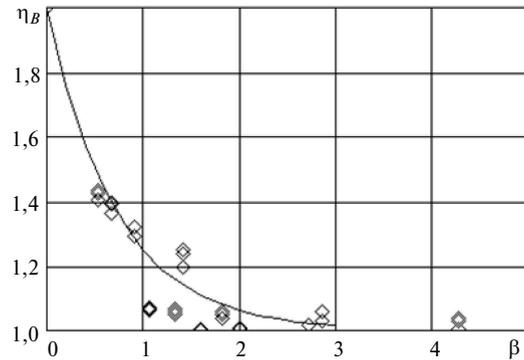


Рис. 3. Зависимость коэффициента η_B от параметра β :
 ◇ — результаты численного анализа;
 — — расчет по (2)

Результаты расчета по этим формулам при $\eta_B = 1$ показаны на рис. 2 сплошными линиями.

Расчет ездового тавра на сопротивление усталости актуален в тех случаях, когда тот испытывает достаточно большое количество циклов нагружения. При этом надо иметь в виду, что, например, за один цикл работы крана через определенное сечение ездового тавра проходит две или четыре пары колес. То есть количество циклов местного нагружения в 2–4 раза больше, чем циклов работы крана. Проверка на сопротивление усталости выполняется по условиям

$$\Delta\sigma_{y1} \leq [\Delta\sigma_f] \quad \text{и} \quad \Delta\sigma_{x3} \leq [\Delta\sigma_f], \quad (4)$$

где $\Delta\sigma_{y1}, \Delta\sigma_{x3}$ — размахи соответствующих местных напряжений, возникающие при проходе колеса по балке; $[\Delta\sigma_f] = \Delta\sigma_f/n$ — допускаемый размах по условию сопротивления усталости; $\Delta\sigma_f$ — предел выносливости по размаху напряжений.

Для прокатного тавра (двутавра) с прокатной поверхностью без сварных соединений предел выносливости при симметричном цикле на базе $N_0 = 2 \cdot 10^6$ циклов без учета градиента напряжений при изгибе и концентрации напряжений (она учтена в коэффициентах (3)) составляет $\sigma_{-1} = 0,3\sigma_B$ [8]. Коэффициент асимметрии цикла нагружения по напряжениям σ_{y1} составляет $R_{y1} = 0$. Коэффициент асимметрии по напряжениям σ_{x3} в зоне $0,1 < \lambda < 0,4$ лежит в области $R_{x3} = -(0,1-0,2)$. Таким образом, $\Delta\sigma_{y1} = \sigma_{y1}$, $\Delta\sigma_{x3} = \sigma_{x3}(1-R_{x3})$.

Предел выносливости тавра по размаху напряжений на базе $N_0 = 2 \cdot 10^6$ циклов в указанных расчетных зонах вычисляется с учетом градиента местных напряжений [8] как

$$\Delta\sigma_{f0} = \frac{2\sigma_{-1}}{\varphi_a + \psi}.$$

Здесь φ_a — коэффициент эквивалентности напряжений, для элементов толщиной 10–30 мм $\varphi_a \approx 0,85$ [8]; $\psi = 0,2$ — коэффициент чувствительности к асимметрии цикла. Следовательно, при $\sigma_T = 0,7\sigma_B$ получим $\Delta\sigma_{f0} = 0,8\sigma_T$. При этом допустимый размах напряжений по условию сопротивления усталости будет иметь вид [2, 9]

$$[\Delta\sigma_f] = 0,8 \frac{\sigma_T}{n} \sqrt[3]{\frac{N_0}{z_e}}, \quad (5)$$

где $z_e = \xi_f C$ — эквивалентное количество циклов нагружения; C — количество циклов работы крана за срок службы; ξ_f — коэффициент циклического нагружения, равный количеству

проходов колес по одному месту ездового тавра за один цикл работы крана.

Из условий (1) и (4) с учетом выражения (5) можно вычислить, какую долговечность будет иметь ездовой тавр, если условие прочности с учетом местных напряжений обеспечено по равенству. Считая, что коэффициенты запаса по прочности и сопротивлению усталости одинаковы, а напряжения от общего изгиба в месте расположения колеса равны нулю (консольная балка), и принимая $\xi_f = 2$, получим долговечность в точке 1 $C = 500\,000$ циклов работы крана, а в точке 3 — $C = 350\,000$ циклов работы крана. Это означает, что для режима работы кранов до А6 при вышеуказанных допущениях выполнение условия прочности ездового тавра гарантирует обеспечение его долговечности. Для кранов с более тяжелым режимом работы или при большем количестве колес, или при наличии общего изгиба необходимо выполнять специальный расчет на сопротивление усталости по условию (4) с использованием допустимого напряжения (5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по кранам: В 2 томах. Т. 1. / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин [и др.]; Под общ. ред. М.М. Гохберга. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 536 с.
2. Соколов С.А. Строительная механика и металлические конструкции машин. СПб.: Политехника, 2011. 450 с.
3. ISO 16881–1. 2005. Cranes. Design calculation for rail wheels and associated trolley track supporting structure. Part 1: General
4. FEM 9.341. 1983. Contraintes locales dans une poutre.
5. ГОСТ 8239–89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент.
6. ГОСТ 26020–83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент.
7. Александров М.П. Грузоподъемные машины. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана.— Высшая школа, 2000. 552 с.
8. Юшкевич В.Н. Метод расчета пределов выносливости элементов металлоконструкций. // Проблемы прочности 1984. № 9. С. 13–17.
9. Kuhlman U., Euler M., Kudla K. Beitrag zur Ermüdungsbemessung von Stahlbruecken nach Eurocode. *Stahlbau* 80, Heft 11. 2011. S. 852–858.

REFERENCES

1. Spravochnik po kranam: V 2 tomakh. T.1. / V.I. Braude, M.M. Gokhberg, I.E. Zvyagin [i dr.].; Pod obshch. red. M.M.Gokhberga. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd, 1988. 536 s. (rus.)
2. Sokolov S.A. Stroitel'naya mekhanika i metallicheskie konstruksii mashin. SPb.: *Politekhnika*, 2011. 450 s. (rus.)
3. ISO 16881–1. 2005. Cranes. Design calculation for rail wheels and associated trolley track supporting structure. Part 1: General. (rus.)
4. FEM 9.341. 1983. Contraintes locales dans une poutre. (rus.)
5. ГОСТ 8239–89. Dvutavryi stalnyie goryachekatanyie. Sortament. (rus.)
6. ГОСТ 26020–83. Dvutavryi stalnyie goryachekatanyie s parallelnyimi granyami polok. Sortament. (rus.)
7. Aleksandrov M.P. Gruzopod'emnyie mashinyi. M.: Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana, Vyisshaya shkola, 2000. 552 s. (rus.)
8. Yushkevich V.N. Metod rascheta predelov vynoslivosti elementov metallokonstruksiy. *Problemy prochnosti*. 1984. № 9. S. 13–17. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СОКОЛОВ Сергей Алексеевич — доктор технических наук профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; действительный член Академии проблем качества; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: sokolov_sa@rambler.ru

КРАСНОВА Светлана Викторовна — студентка 4-го курса кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия.

AUTHORS

SOKOLOV Sergey A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: sokolov_sa@rambler.ru

KRASNOVA Svetlana V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

УДК 621.867.17

С.В. Никитин

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГО-ВЯЗКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕЙЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

S.V. Nikitin

CALCULATED DEFINITION OF VISCO-ELASTIC PARAMETERS OF THE CONVEYOR CHAINS

Показана возможность достаточно точного определения упруго-вязких параметров тяговых цепей конвейеров расчетным способом. Это необходимо, чтобы более точно определять динамические составляющие нагрузок при создании наиболее достоверных моделей машин.

УПРУГО-ВЯЗКИЕ ПАРАМЕТРЫ; ЦЕПНОЙ КОНВЕЙЕР; ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ; КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ.

The possibility of reasonably accurate determination of chains conveyor's viscoelastic parameters using calculation methods are demonstrated. It is necessary to create the most accurate models of machines that are needed to more accurately determine the dynamic component of loads.

VISCO-ELASTIC PARAMETERS; CHAIN CONVEYOR; DYNAMIC LOADS; THE ABSORPTION COEFFICIENT.

Использование цепных конвейеров в промышленности обусловлено их относительной простотой, высокой производительностью, надежностью в работе [1, 2]. В качестве тягового элемента применяют цепи различных конструкций. В конвейерах с простой плоской трассой тяговым элементом служат пластинчатые цепи и некоторые виды специальных цепей. При необходимости создания пространственной трассы чаще применяют разборные цепи, реже — круглозвенные.

Использование того или иного типа цепей зависит от назначения, условий работы машины, технических задумок конструктора. Выбор типоразмера производится по разрывному усилию $S_{\text{разр}}$, данному в каталогах:

$$S \leq \frac{S_{\text{разр}}}{n}, \quad (1)$$

где S — действующее в цепи растягивающее усилие; n — коэффициент запаса, принимаемый достаточно высоким, в пределах от 8 до 20 [3, 4], в зависимости от типа цепи, характера трассы конвейера и условий работы. Это связано с тем, что расчетная формула не учитывает действительное напряженное состояние элементов цепи. По-

этому увеличением значения запаса стремятся компенсировать неточности, снизить контактные напряжения в шарнире для уменьшения износа и ограничения усталостного фактора.

Определение действующих в цепи растягивающих усилий S также связано с рядом неточностей. При расчете оно определяется суммой статического и динамического натяжений, $S = S_{\text{ст}} + S_{\text{дин}}$.

Методики определения статического натяжения тягового органа конвейеров разработаны достаточно хорошо. Динамические же нагрузки в цепных конвейерах изучены слабо; это до сих пор относится к числу важных научных проблем.

Одна из них — определение нагрузок, вызванных кинематикой зацепления приводом шарнира цепи. Данной проблемой занимались многие известные ученые — Г.Г. Ганфштенгель, А.А. Долголенко, И.Г. Штокман [5]. Однако их методики применимы для конвейеров малой длины, а в иных случаях дают завышенные значения усилий.

Согласно (1), имея завышенные значения нагрузки S и коэффициента запаса n , необходимо выбирать цепи, рассчитанные на большую разрывную нагрузку.

Проблема более обоснованного выбора коэффициента запаса может быть решена созданием и использованием в расчетах методик усталостного и износного разрушения цепей. Для более точного определения динамической составляющей усилий, действующих в цепи, профессором В.Н. Смирновым были разработаны теоретические основы создания дискретных динамических моделей цепных конвейеров в относительных координатах [6]. Позже модели были усложнены тем, что цепной тяговый элемент в них был представлен упруго-вязким изотропным стержнем с распределенными параметрами [7], а математически свободные колебательные явления в такой системе описываются уравнением в частных производных

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\eta F}{m_0} \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t}. \quad (2)$$

В этом уравнении $U(t, x)$ — функция перемещений во времени t сечений цепи, расположенных в точке с координатой x . Параметры m_0 , F имеют смысл соответственно массы одного метра тяговой цепи совместно с закрепленными на ней грузом и грузонесущими устройствами и площади поперечного сечения цепи. Коэффициенты v и η определяют соответственно скорость распространения упругой волны цепи и уровень поглощаемой системой энергии волны.

Ясно, что адекватность таких моделей цепных конвейеров определяется не только близостью математического описания реальным физическим явлениям, но и достоверностью задания коэффициентов, определяющих упруго-вязкие параметры тягового элемента. В условиях проектирования и исследований определение коэффициентов v и η при помощи натуральных экспериментов — наиболее надежно, но и дорогостояще, поэтому был предложен ряд расчетных, аналитических методов.

Скорость распространения упругой волны в тяговом органе v определяется известным соотношением

$$v = \sqrt{\frac{E_{ц} F}{m_0}},$$

где $E_{ц}$ — модуль упругости цепи. Поскольку тяговая цепь не является однородным изотропным стержнем, необходимо определять обобщенный параметр жесткости $E_{ц} F$ для единицы ее длины.

Для исследования возможности расчетного определения параметра обобщенной жесткости были проведены расчеты на растяжение цепей типа Р2 по ГОСТ 589–85. Численные эксперименты на конечно-элементных моделях проводили в среде SolidWorks (рис. 1, а). Результаты расчетов сравнивали с данными натуральных экспериментов, проведенных на кафедре транспортных и технологических систем СПбГПУ.

Исследовали модели цепей Р2–100–160, Р2–100–220, Р2–160–290, Р2–160–400 с глобальным размером конечно-элементной сетки 6 и 3 мм. Между соприкасающимися поверхностями элементов цепей для предотвращения произвольного смещения деталей при итерационном процессе расчетов заданы контактные граничные условия «Нет проникновения» с коэффициентом трения 0,05.

При обработке экспериментальных данных обобщенная жесткость определялась законом Гука:

$$E_{ц} F = \frac{P L_{зц}}{\Delta l}, \quad (3)$$

где P — растягивающее усилие, которое при проведении численного эксперимента варьировалось от 1000 Н до разрывного усилия цепи; $L_{зц}$ —

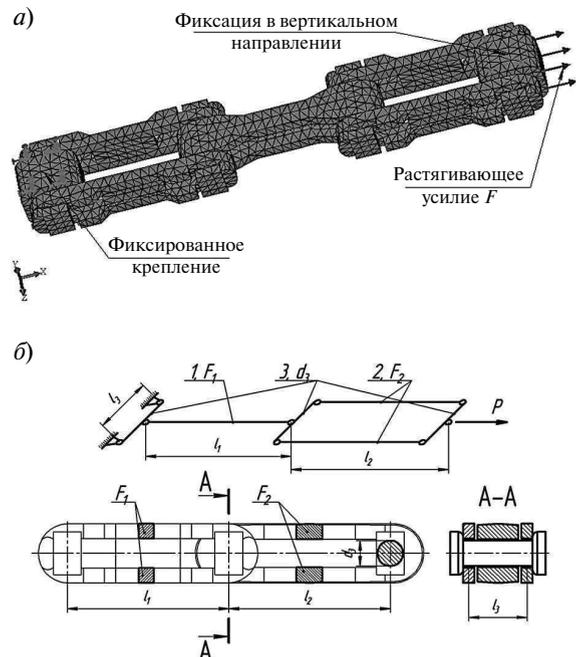


Рис. 1. Расчетная модель тяговых цепей: а — конечно-разностная модель; б — аналитическая расчетная схема

длина исследуемого участка цепи; Δl — удлинение рассчитываемого участка цепи.

На рис. 2, а представлены в виде графиков результаты расчета по конечно-элементным моделям в координатах «усилие растяжения — удлинение», пересчитанные на длину 1 м цепи. Расчет по формуле (3) дает следующие значения обобщенной жесткости $E_{ц}F$: $1,61 \cdot 10^7$ Н/м — для моделей цепей P2–100 независимо от типоразмера; $3,1 \cdot 10^7$ Н/м — для модели цепи P2–160–290; $5,04 \cdot 10^7$ Н/м — для P2–160–400. После отметки 50000 Н жесткость всех моделей незначительно возрастает.

На рис 2, б приведены результаты натурального эксперимента для разборных цепей с шагом 100 и 160 мм, которые представляют собой нелинейную зависимость между нагрузкой и деформацией. Эту зависимость с погрешностью 5–7 % легко аппроксимировать двумя линейными участками с пересечением в зоне 10 кН.

Для проведения экспериментов были выбраны две новые и приработавшаяся цепь. Угол наклона второго участка графика для последней цепи больше, чем для новой цепи того же типоразмера. Это говорит о том, что в процессе работы машины жесткость тягового элемента несколько повышается со временем.

Сравнивая результаты натурального эксперимента с расчетным, можно отметить, что в реальных цепях существует начальный участок с меньшей жесткостью, который можно объяснить первоначальной деформацией неровностей контактирующих поверхностей.

По результатам анализа данных натурального эксперимента жесткость одного метра тяговой цепи с шагом 100 мм составляет: $0,836 \cdot 10^7$ Н/м на первом участке; $1,43 \cdot 10^7$ Н/м на втором участке. Для новой цепи с шагом 160 мм: $1,29 \cdot 10^7$ Н/м на первом участке; $2,4 \cdot 10^7$ Н/м на втором участке. Для цепи с притертыми шарнирами: $1,25 \cdot 10^7$ Н/м на первом участке; $3,56 \cdot 10^7$ Н/м на втором участке.

Следует отметить, что определяющим фактором при расчете воздействий на цепь является жесткость на втором участке.

Обобщенный модуль упругости цепи также можно оценить по зависимости (3), определив ее удлинение Δl приближенным аналитическим расчетом.

Согласно схеме (см. рис. 2, б) удлинение участка цепи с длиной, равной двум шагам, складывается из удлинения двух наружных пластин Δl_1 , удлинения внутреннего звена Δl_2 и изгиба двух валиков $2\Delta l_3$:

$$\Delta l = \Delta l_1 + 2\Delta l_2 + \Delta l_3. \quad (4)$$

Кроме указанных, элементы цепей при ее растяжении испытывают неучтенные аналитической моделью деформации: изгиб боковых пластин, изгиб стенок внутреннего звена, деформации в местах контакта звеньев. Поэтому для их учета необходимо ввести соответствующие поправочные коэффициенты K_1, K_2, K_3 . Таким образом, выражение для аналитического отыскания деформации участка цепи приобретает вид

$$\Delta l = K_1\Delta l_1 + 2K_2\Delta l_2 + K_3\Delta l_3. \quad (5)$$

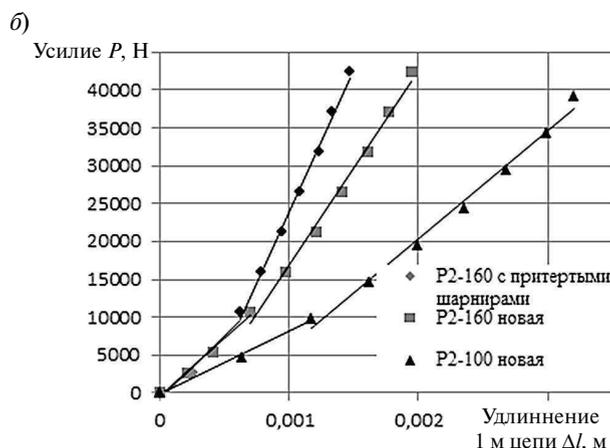
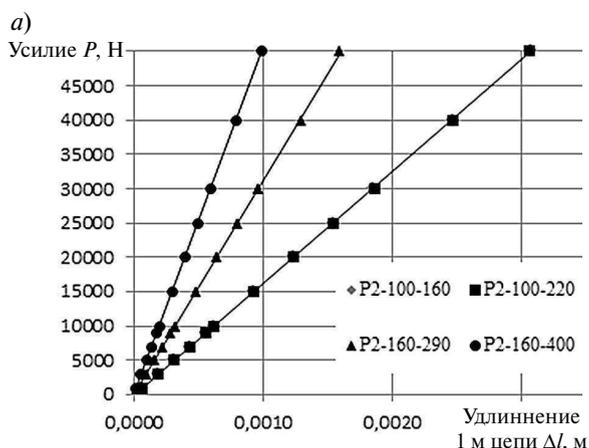


Рис. 2. Результаты расчета удлинения разборных цепей по конечно-элементным моделям

Удлинения Δl_1 , Δl_2 и Δl_3 определяются известными выражениями

$$\Delta l_1 = \frac{Pl_1}{2EF_1}; \Delta l_2 = \frac{Pl_2}{EF_2}; \Delta l_3 = \frac{Pl_3^3}{48EJ} = \frac{4Pl_3^3}{3E\pi d_3^4}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости стали.

Подставив (6) в (5), а затем в (3), получаем конечное аналитическое выражение для расчета погонной жесткости разборной цепи:

$$E_{\text{ц}} F = \frac{6E\pi d_3^4 F_1 F_2}{3\pi d_3^4 F_2 l_1 K_1 + 12\pi d_3^4 F_1 l_2 K_2 + 8l_3^3 F_1 F_2 K_3}. \quad (7)$$

Здесь F_1 и F_2 — площади поперечного сечения наружной и внутренней пластин; l_1 и l_2 — их длины; d_3 и l_3 — диаметр и длина оси цепи; $l = l_1 + l_2$ — длина растягиваемого участка цепи.

Поправочные коэффициенты определялись расчетным путем как отношение деформации соответствующих элементов цепи, найденной расчетом методом конечных элементов, к деформации, найденной по соотношениям (6). Для разборных цепей типа P2 средние значения коэффициентов составляют $K_1 = 1,31$; $K_2 = 2,93$; $K_3 = 2,35$ (независимо от типоразмера).

Обобщив результаты расчетов обобщенного модуля упругости разборных цепей (табл. 1), можно сделать вывод о том, что метод использования конечно-элементной модели в условиях дефицита экспериментальных данных наиболее приемлем. Данные этих расчетов близки к натурным измерениям для цепей с притертыми шарнирами. Использование аналитической зависимости с введенными поправочными коэффициентами, которые должны быть предварительно определены, могут быть пригодны для оценки жесткостей новых цепей.

Интенсивность процесса затухания упругих волн в системе, описываемой уравнением (2), определяется коэффициентом вязкости η [8].

Точное описание явлений, вызывающих поглощение энергии в тяговом элементе, опирается на ряд известных гипотез об их физическом происхождении [9] и представляет определенную сложность для использования в моделях. Вязкое сопротивление, введенное в модель (2), только упрощенно описывает эти явления, при этом необходимым условием выступает энергетическая эквивалентность его действия.

Мерой эквивалентности служат параметры, определяющие уровень поглощаемой энергии в рассматриваемой системе: коэффициент поглощения ψ или логарифмический декремент γ [10].

Известно, что коэффициент поглощения определяется как отношение энергии, рассеиваемой за один период гармонического колебания (ΔW), к максимальной упругой энергии (W): $\psi = \Delta W/W$. Из теории колебаний известна связь логарифмического декремента γ с коэффициентом поглощения ψ , определяемая как $\psi = 1 - e^{-2\gamma}$. Для малых колебаний можно принять $\psi = 2\gamma$.

Стендовые исследования разборных цепей типа P2 с шагом 100 и 160 мм позволили определить их коэффициенты поглощения статическим методом [13]. Для этого по экспериментальным зависимостям между удлинением цепей Δl и прикладываемой растягивающей нагрузкой P при последовательном нагружении и разгрузке (рис. 3) были подсчитаны площади петли гистерезиса ΔW и максимальная упругая энергия за цикл деформации W .

Таблица 1

Результаты определения погонной жесткости разборных цепей различными методами

| Метод определения жесткости | Значения жесткости, Н/м | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|------------|--|------------|
| | P2–100–160 | P2–100–220 | P2–160–260 | P2–160–400 |
| Аналитическая зависимость (7) | 12040499 | 15160448 | 20247025 | 41049482 |
| Расчет по конечно-элементной модели | 16230247 | 16134614 | 30875915 | 50475614 |
| По результатам стендовых испытаний | — | 14273860 | 24126111 (новая цепь) 35561001 (цепь с притертыми шарнирами) | — |

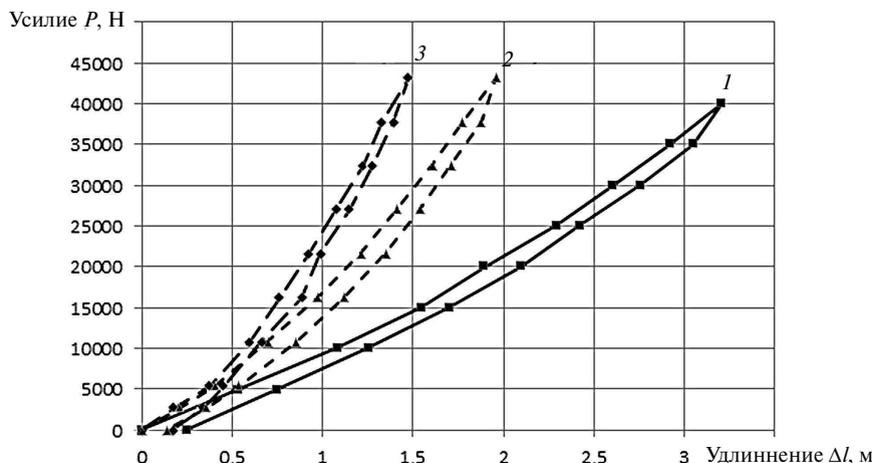


Рис. 3. Зависимости удлинения Δl , м, цепей от растягивающего усилия P , Н

Эти данные позволяют вычислить статический коэффициент поглощения $\psi_{ст}$. Для получения коэффициента поглощения, соответствующего тому, который мог быть получен при динамических испытаниях цепей (ψ_d), воспользуемся зависимостью [6]

$$\psi_d = 1 - \left(\frac{1 - 0,25\psi_{ст}}{1 + 0,25\psi_{ст}} \right)^2.$$

Результаты вычислений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Величины коэффициентов поглощения

| Вид цепи | $\psi_{ст}$ | ψ_d |
|-------------------------------------|-------------|----------|
| Новая цепь с шагом $t = 100$ мм | 0,242 | 0,215 |
| Притертая цепь с шагом $t = 160$ мм | 0,284 | 0,247 |
| Новая цепь с шагом $t = 160$ мм | 0,324 | 0,277 |

Имея значения коэффициентов поглощения для цепей различных типоразмеров, можно ставить вопрос об определении соответствующих коэффициентов вязкости η .

В главе 6 книги [6] автор приводит несколько формул, полученных на базе теории колебаний, для определения коэффициента сопротивления b применительно к дискретным моделям конвейеров. Он делает вывод о необходимости использовать при построении моделей, соотношение

$$b = \frac{\lambda\psi}{2\pi} m, \tag{8}$$

которое, по его расчетам, дает постоянные значения коэффициента независимо от частоты, амплитуды колебаний и параметров модели, зависящих от ее дискретности.

Там же приведена и другая формула, учитывающая влияние частоты вынужденных колебаний на величину поглощаемой энергии при вязком характере сопротивлений:

$$b = \frac{c\psi}{2\pi\omega}, \tag{9}$$

где c — коэффициент жесткости упругой связи; ω — угловая частота вынужденных колебаний.

В случае описания конвейера моделью с распределенными параметрами (2) связь между коэффициентом вязкости и сопротивления выражается соотношением $b = \eta F/\Delta x$, где Δx — расстояние между двумя массами в дискретной модели. Подставляя это соотношение в (9) и учитывая то, что $c = E_{ц}F/\Delta x$ и что следует, как в случае с жесткостью цепей, определять не сам коэффициент вязкости, а его произведение на площадь поперечного сечения цепи F , которое назовем обобщенным коэффициентом вязкости, получим

$$\eta F = \frac{E_{ц}F\psi}{2\pi\omega}. \tag{10}$$

Таким образом, использование формулы (10) для определения коэффициента вязкости должно обеспечить независимость уровня поглощения энергии от амплитуды колебаний и различных частот возмущений.

Для подтверждения этих свойств был проведен ряд численных экспериментов по определению поглощаемой доли полной энергии, которая состоит из суммы кинетической и потенциальной энергий элементов модели тягового органа конвейера, вычисляемых после решения уравнения (2).

Экспериментальная модель представляла собой контур конвейера с длиной цепи $L = 1000$ м, обобщенный модуль упругости $E_{\text{ц}}F = 190 \cdot 10^6$ Н/м. Цепь — пластинчатая с шагом 0,2 м. Скорость движения конвейера принимала значения 0,33; 0,521; 0,75; 1,0 м/с, что соответствует величинам угловых частот возмущений, равным 10,3; 16,3; 23,5; 31,3 рад/с при числе зубьев приводной звездочки 25.

Уравнение (2) решалось численно методом конечных разностей, построенным по неявной схеме. Величина полной энергии тягового органа в момент времени t определялась соотношением $W^t = \Pi^t + E^t$.

Величины потенциальной и кинетической энергий:

$$\Pi^t = \frac{E_{\text{ц}}F}{2\Delta x} \sum_{i=0}^{n-1} (U_{i+1}^t - U_i^t)^2;$$

$$E^t = \frac{m_i \Delta x}{2\Delta t^2} \sum_{i=0}^{n-1} (U_i^{t+1} - U_i^{t-1} + U_{i+1}^{t+1} - U_{i+1}^{t-1})^2,$$

где U_i^t — результаты решения уравнения (2) для i -го узла в момент времени t ; n — количество узлов разбиения тягового органа; m_i — масса элемента тягового органа длиной Δx ; Δx , Δt — дискретность системы соответственно по координате и времени.

Первый эксперимент имел своей целью показать зависимость уровня поглощаемой системой энергии от частоты возмущающих воздействий. При этом обобщенный коэффициент вязкости ηF принимал значения 0, 1000, 5000, 10000, 30000, 50000, 75000, 125000, 250000, 350000, 400000.

Для этого определялись величины полной энергии системы за время одного периода возмущения при каждом значении обобщенного коэффициента вязкости (рис. 4, а), а коэффициент поглощения вычислялся по зависимости

$$\psi = \frac{\Delta W}{W_{\eta F=0}} = \frac{W_{\eta F=0} - W_{\eta F>0}}{W_{\eta F=0}}. \quad (11)$$

Результаты этого исследования представлены на графике рис. 4, б, где четко наблюдается рост величины поглощаемой энергии с ростом как обобщенного коэффициента вязкости, так и угловой частоты возмущения. Это говорит о том, что принимать постоянное значение коэффициента вязкости в моделях одинаковых конвейеров, но отличающихся лишь частотой возмущений, как предложено в [11], недопустимо.

Нужно отметить, что графики рис. 4, б также отражают результаты экспериментов при значениях числа зубьев приводной звездочки, равных 20 и 17. Уменьшение числа зубьев практически не изменило окружные частоты возмущений при соответствующих скоростях движения моделей конвейеров, но значительно увеличивало амплитуды возмущений и величины энергий, вносимых в систему. Однако результаты расчета коэффициентов поглощения остались прежними, что

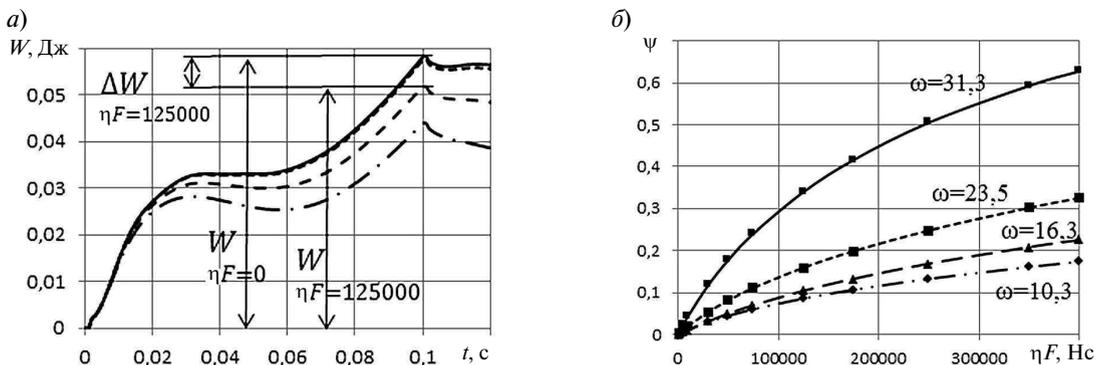


Рис. 4. Графики результатов первого численного эксперимента:

а — изменение полной энергии системы тягового органа цепного конвейера в течение одного периода возмущений (— — $\eta F = 0$; - - - - $\eta F = 10000$; - - - - $\eta F = 125000$; — · — $\eta F = 400000$); б — расчетные значения коэффициента поглощения ψ при заданных значениях обобщенного коэффициента вязкости ηF

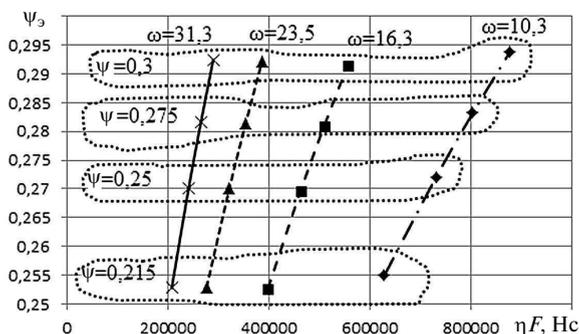


Рис. 5. График зависимости численно полученных значений коэффициента поглощения ψ_3 при введенных в модель коэффициентах обобщенной вязкости ηF , рассчитанных по соотношению (10)

свидетельствует о нечувствительности величины поглощаемой энергии к значениям амплитуд колебаний моделей.

При проведении второго эксперимента величины обобщенного коэффициента вязкости определялись по формуле (10) при заранее определенных коэффициентах поглощения ψ , равных соответственно 0,3; 0,275; 0,25; 0,215. Величина экспериментального коэффициента поглощения ψ_3 также определялась зависимостью (11).

Результаты, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что использование соотношения (10) для определения величины обобщенного коэффициента вязкости для моделей цепных конвейеров позволяет получить уровень сопротивлений, близкий к заданному значению.

Конечно, реально вычисленный коэффициент поглощения может отличаться от заданного. Так, например, при заданном $\psi = 0,215$ отличие экспериментального коэффициента ψ_3 составляет порядка 18,6 %. Однако, близость расчет-

ных значений ψ_3 между собой при различных частотах возмущения (что на графиках показано пунктирной линией, объединяющей точки различных линий с заданным значением коэффициента ψ) говорит о правомерности использования предложенной зависимости.

Основные выводы

Численные значения параметров, используемых при расчетах машин и их узлов, — неотъемлемая часть расчетных моделей, они непосредственно влияют на адекватность получаемых результатов. В случае моделирования колебательных процессов в тяговом органе цепных конвейеров такими параметрами являются жесткость цепи и коэффициент вязкого сопротивления.

Как было отмечено ранее, наиболее точного определения этих параметров можно добиться путем проведения натурных экспериментов. Однако в современных условиях этот способ достаточно дорог и трудозатратен.

Предложенные способы определения коэффициента жесткости — чисто расчетные, но позволяют получить значения требуемого параметра в пределах 10 %-й погрешности.

Соотношение для определения коэффициента обобщенной вязкости включает в себя угловую скорость возмущающих воздействий и введено в модель как значительное упрощение реальных физических явлений поглощения энергии. Однако при исследовании и расчетах нагрузок в цепных конвейерах этого достаточно, чтобы внести в модель уровень сопротивлений распространению упругих волн, близкий к реально полученным при стендовых испытаниях цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В.Н., Мазо Б.И. Некоторые критерии по выбору транспортирующих устройств в условиях автоматизированного производства // Материалы семинара: Современное подъемно-транспортное оборудование. ЛДНТП, 1990. С. 27–31.
2. Орлов И.В. Основные направления механизации и автоматизации в автомобильной промышленности // Механизация и автоматизация производства. 1976. №7. С. 4–7.
3. Пертен Ю.А. Теоретические основы конвейеров с тяговыми элементами. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1981. 275 с.
4. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1983. 487 с.
5. Долголенко А.А. Динамические усилия в замкнутых тяговых органах подъемно-транспортных машин // Сб.: Новая подъемно-транспортная техника. №14. М.: Машгиз, 1949. С. 169–181.
6. Смирнов В.Н. Подвесные конвейеры. Теория расчета, прогнозирование тенденций развития. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. 267 с.
7. Смирнов В.Н., Никитин С.В. Логистическая модель исследований волновых процессов в тяговом

органе конвейера // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. №3(106). С. 78–85.

8. **Штокман И.Г.** Динамика тяговых цепей рудничных конвейеров. М.: Углетехиздат, 1959. 290 с.

9. **Сорокин Е.С.** К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Госстройиздат, 1960. 215 с.

10. **Пановко Я.Г.** Основы прикладной теории ко-

лебаний и удара. Изд. 3-е, доп. и переработ. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.

11. **Смирнов В.Н., Маланин Д.О.** Определение сил внутреннего трения в узлах и механизмах подвесных толкающих конвейеров // Известия Тульского государственного университета. Серия: Подъемно-транспортные машины. Вып. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2001. С. 94–100.

REFERENCES

1. **Smirnov V.N., Mazo B.I.** Nekotoryye kriterii po vyboru transportiruyushchikh ustroystv v usloviyakh avtomatizirovannogo proizvodstva. *Materialy seminara: Sovremennoye pod'yemno-transportnoye oborudovaniye*. LDNTP, 1990. S. 27–31. (rus.)

2. **Orlov I.V.** Osnovnyye napravleniya mekhanizatsii i avtomatizatsii v avtomobilnoy promyshlennosti. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva*. 1976. №7. S. 4–7. (rus.)

3. **Perten Yu.A.** Teoreticheskiye osnovy konveyerov s tyagovymi elementami. L.: Izd-vo Leningradskogo universiteta, 1981. 275 s. (rus.)

4. **Spivakovskiy A.O., Dyachkov V.K.** Transportiruyushchiye mashiny. M.: Mashinostroyeniye, 1983. 487 s. (rus.)

5. **Dolgolenko A.A.** Dinamicheskiye usiliya v zamknutykh tyagovykh organakh pod'yemno-transportnykh mashin // *Sbornik: Novaya pod'yemno-transportnaya tekhnika*. №14. M.: Mashgiz, 1949. S. 169–181. (rus.)

6. **Smirnov V.N.** Podvesnyye konveyery. Teoriya ra-

scheta, prognozirovaniye tendentsiy razvitiya. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2006. 267 s. (rus.)

7. **Smirnov V.N., Nikitin S.V.** Logistic model of the discovering of wave process lain in pulling elements of the conveyor. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2010, №3(106). P. 78–85. (rus.)

8. **Shtokman I.G.** Dinamika tyagovykh tsepey rudnichnykh konveyerov. M.: Ugletekhizdat, 1959. 290 s. (rus.)

9. **Sorokin Ye.S.** K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh system. M.: Gosstroyizdat, 1960. 215 s. (rus.)

10. **Panovko Ya.G.** Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara. Izd. 3-ye, dop. i pererabot. L.: Mashinostroyeniye, 1976. 320 s. (rus.)

11. **Smirnov V.N., Malanin D.O.** Opredeleniye sil vnutrennego treniya v uzlakh i mekhanizмах podvesnykh tolkayushchikh konveyerov. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pod'yemno-transportnyye mashiny*. Vyp. 2. Tula: Izd-vo TulGU, 2001. S. 94–100. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

НИКИТИН Сергей Васильевич — кандидат технических наук ассистент кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: sergey_nikj@mail.ru

AUTHOR

NIKITIN Sergey V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: sergey_nikj@mail.ru

УДК 621.822.6; 621.892.09

*Д.В. Терентьев, С.И. Платов,
Ю.В. Жиркин, Е.И. Мироненков*

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СМАЗЫВАНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СЛЯБОВЫХ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

*D.V. Terentiev, S.I. Platov,
Yu.V. Zhirkin, E.I. Mironenkov*

DEVELOPMENT OF RATIONAL MODES OF LUBRICATION OF BEARING UNITS SLAB CONTINUOUS CASTING MACHINES

В статье рассматриваются вопросы прогнозирования режима трения в контакте подшипниковых узлов роликковой проводки машины непрерывной разливки слэбов в зависимости от типа смазочного материала, способа его доставки в узел трения и технологических параметров процесса литья. СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ; ПОДШИПНИКОВЫЙ УЗЕЛ; СИСТЕМА СМАЗЫВАНИЯ «МАСЛО-ВОЗДУХ».

The purpose of the work is the prognosis of friction mode in rolling contact of bearing units of roll guide slab continuous casting machine in dependence of lubricant type, method of its delivery to friction unit and technological parameters of casting.

LUBRICANT; THE BEARING ASSEMBLY; LUBRICATION SYSTEM «OIL-TO-AIR».

За сравнительно короткий период времени способ непрерывного литья заготовок получил широкое распространение в сталеплавильном производстве, коренным образом изменив процесс разливки и все металлургическое производство. Около 80 % мировой выплавки стали разливается на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Большие мощности кислородно-конвертерного цеха (ККЦ) требуют высокопроизводительных машин непрерывного литья заготовок для производства слэбов. Проблемы повышения производительности решаются увеличением скорости литья и коэффициента использования. Стойкость подшипниковых опор роликковых секций напрямую влияет на коэффициент использования.

Прочность корочки слитка, выходящего из кристаллизатора, невелика, и поэтому для предупреждения ее выпучивания и разрыва за кристаллизатором устанавливают неприводную роликковую проводку, снабженную продольными и поперечными роликами, расположенными на-

против четырех граней слитка. Как было уже отмечено, в первом этапе исследования на всех четырех МНЛЗ установлены по две неприводные роликковые проводки с шарикоподшипниками № 212 (на МНЛЗ № 1, № 4) и роликподшипниками № 76–180512 (на МНЛЗ № 2, № 3). К неприводной роликковой проводке (ее часто называют неприводной, или холостой, роликковой секцией) предъявляются определенные требования, вытекающие из частых прорывов жидкого металла и необходимости точного расположения роликов по отношению к технологической оси машины, а именно: простота конструкции, высокая точность установки и возможность ее регулирования ($\pm 0,3$ мм), возможность быстрой замены (не более 90 мин). Ниже неприводных проводок установлены приводные роликковые проводки, предназначенные для предупреждения выпучивания корочки слитка, для перемещения слитка вдоль технологической оси машины и его выпрямления (правки). На МНЛЗ № 1 и № 4 — по 11 приводных роликковых секций,

а на МНЛЗ № 2 и № 3 — по 9 приводных роликовых секций с различными двухрядными сферическими роликоподшипниками.

К приводной роликовой проводке предъявляются следующие требования, вытекающие из наличия жидкой фазы в слитке и условий работы машины:

вытягивание слитка должно осуществляться с возможно наименьшими усилиями на корку со стороны роликов;

перегрузки роликов при вытягивании и разгибании охлажденного слитка и пропуске наплывов на его поверхности должны быть сведены к минимуму;

конструкция проводки должна обеспечивать уборку остывшего слитка кусками не менее трех метров в случае возникновения аварии и замену секции в кратчайшее время.

На пути движения в роликовой проводке слиток подвергается интенсивному охлаждению водой, подаваемой форсунками.

Высокие температуры и вода оказывают влияние на уплотнительные узлы подшипниковых опор роликов в роликовых секциях, что приводит к нарушению требований, предъявляемых к роликовым проводкам. Выполнить данные требования возможно лишь при соблюдении технологического процесса и достаточного смазывания подшипниковых опор смазочным материалом.

Приняв допущение о том, что в зоне контакта подшипников качения работает минеральное масло (составляющая часть пластичного смазочного материала), можно рассчитать толщину масляной пленки в зоне контакта.

Угол действия нагрузки в подшипниках роликовых секций составляет 8–20°.

Известно [1, 2], что в условиях контактногидродинамической смазки существенное влияние на перераспределение гидродинамического давления оказывает параметр скорости — \bar{U} :

$$\bar{U} = \frac{\eta_0 U}{ER}. \quad (1)$$

Следовательно, в данном случае только изменение вязкости ведет к изменению параметра скорости \bar{U} , а именно к его повышению с ростом вязкости минерального масла. Это в свою очередь приводит к росту пика давления на контакте и к снижению ресурса подшипников. Повышенная вязкость смазочного материала при

частом срабатывании смазочных питателей от работы централизованных станций в автоматическом режиме ведет к более высоким контактным напряжениям, а это снижает срок службы подшипника. Так повышение контактных напряжений в 1,13 раза в соответствии с зависимостью $L = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}}$ ведет к снижению долговечности L подшипника в 1,5 раза.

В связи с этим для снижения параметра скорости необходимо понижать класс вязкости смазочного материала. Но одновременно необходимо обеспечить в подшипнике качения возможность реализации режима эластогидродинамической смазки.

Нагрузку на каждый ролик подшипника и угол зоны нагружения подшипника определяем по следующей формуле [3]:

$$Q_{\psi_i} = Q_{\max_i} \left[1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 - \cos \psi_i) \right]^n, \quad (2)$$

где Q_{ψ_i} — нагрузка на тело качения ряда i в положении ψ^0 , кН; Q_{\max} — нагрузка, воспринимаемая наиболее нагруженным телом качения (ролик), кН; ε — коэффициент, $\varepsilon = 0,5$; ψ_i — угол зоны нагружения для i -го ряда роликов; n — коэффициент, $n = 1,5$ — при точечном, $n = 1,11$ — при линейном контактах.

Угол зоны нагружения для i -го ряда роликов определяем по формуле

$$\psi_i = \arccos(1 - 2\varepsilon) = \pm 90^\circ. \quad (3)$$

Угол между соседними роликами одного ряда определяем по формуле

$$\Delta\psi = \frac{360^\circ}{z}, \quad (4)$$

где z — число тел качения в одном ряду подшипника.

Нагрузка, воспринимаемая наиболее нагруженным телом качения, для всех рядов подшипника будет одинакова и определяется по формуле [3]

$$Q_{\max} = \frac{P}{z J_p \cos \alpha}, \quad (5)$$

где P — нагрузка, действующая на подшипник ролика роликовой секции, $P = 30$ кН; J_p — числовой коэффициент, для двухрядных подшипников качения $J_p = 0,4577$; α — угол контакта ролика с дорожкой качения, $\alpha = 12^\circ$.

По формуле (5) рассчитана нагрузка, действующая на каждый ролик зоны нагружения. Получен следующий результат:

| | |
|-----------------------|-------------------|
| $\pm \psi_{is}$ | Q_{ψ_i} , кН |
| 7,5 | 9,18 |
| 15 | 8,75 |
| 22,5 | 8,21 |
| 30 | 7,50 |
| 37,5 | 6,57 |
| 45 | 5,53 |
| 52,5 | 4,41 |
| 60 | 3,29 |
| 67,5 | 2,20 |
| 75 | 1,22 |
| 82,5 | 0,44 |
| 90 | 0,00 |

Толщина масляной пленки определяется из зависимости

$$h_0 = 3,17(\eta_0 U_{\Sigma})^{0,75} \alpha^{0,6} \rho_{пр}^{0,4} q_H^{-0,15}, \quad (6)$$

где h_0 — толщина смазочного слоя в точке, в которой градиент давления равен нулю, м; η_0 — динамическая вязкость масла при атмосферном давлении и рабочей температуре, Па·с; U_{Σ} — суммарная скорость качения на контакте, м/с; α — пьезокоэффициент вязкости смазочного материала, МПа⁻¹; $\alpha = 0,02$ МПа⁻¹; $\rho_{пр}$ — приведенный радиус кривизны поверхностей трения, м; q_H — нагрузка на единицу длины линии контакта, Н/м;

$$U_{\Sigma} = \frac{\pi D_0 n_i}{60} (1 - \gamma^2), \quad (7)$$

где D_0 — средний диаметр подшипника, м; n_i — частота вращения внутреннего кольца подшипника рабочего вала, об/мин; $n_7 = 1$ об/мин; γ — приведенный коэффициент радиуса кривизны;

$$\gamma = \frac{D_W}{D_0} \cos \alpha; \quad (8)$$

D_W — диаметр ролика, м.

Смазочный материал — Униол 2М; класс вязкости базового масла — 220.

Необходимую вязкость при температурах $T_0 = 40$ °С, $T_0 = 60$ °С, $T_0 = 90$ °С определяем, по зависимости

$$\eta_0 = \eta_3 \left(\frac{T_3}{T_0 k} \right)^n \quad (9)$$

где η_3 — эталонная динамическая вязкость масла при атмосферном давлении; n — коэффи-

циент, зависящий от вязкости смазочного материала, $n = 2,92$; T_0 — объемная температура подшипникового узла, °С; T_3 — температура, при эталонной вязкости масла, °С; k — температурный коэффициент, $k = 1,1-1,8$.

Анализ расчетных значений динамической вязкости при атмосферном давлении и рабочей температуре показывает, что толщина масляной пленки в подшипниках качения в зоне контакта наиболее нагруженного ролика для различных температур $T_0 = 40, 60$ и 80 °С — составляет соответственно 1,15; 0,8; 0,4 мкм.

В процессе эксплуатации в подшипниковые узлы проникают вода, механические примеси (окалина) и высокие температуры, в результате чего пластичный смазочный материал меняет свойства [4].

При эксплуатации машин непрерывного литья заготовок вода является неотъемлемой частью, так как необходимо проводить постоянное охлаждение слябов и роликов в роликовых секциях.

Были обследованы 50 блоков, в которых произошло заклинивание роликов. Результаты мониторинга данных роликов показали, что водяные каналы засорены, соответственно проток воды через корпус средней опоры затруднен и смазочный материал отсутствует в 20-ти % случаев из-за засоренности смазочных магистралей или их разрушений; в более чем 50 % обнаружено значительное обводнение и загрязнение пластичного смазочного материала.

Для того чтобы проанализировать причины попадания воды, пыли, механических частиц, необходимо проследить путь смазывания (подачи смазочного материала) в подшипниковые узлы опор роликовых секций.

От централизованных станций, которые установлены в отдельных маслопомещениях для каждой МНЛЗ, пластичный смазочный материал поступает к блокам питателей. Периодичность включения станции — 30 мин.

После прохождения блока питателей смазочный материал поступает в подшипниковые узлы роликовых секций, где и происходит основной процесс охлаждения водой.

Эксплуатация централизованных станций осуществляется на пластичном смазочном материале Униол-2М, изготовленном по техническим условиям ТУ 38.5901243–92 и предназначенном для применения в узлах трения металлургиче-

ского оборудования с системами централизованного смазывания. Основные эксплуатационные характеристики этого пластичного смазочного материала — высокая термостойкость, хорошие противозадирные характеристики, прокачиваемость и работоспособность при температуре от -30 до $+160$ °С

С использованием тепловизора «THERMO-KAM P60» были произведены замеры температур на смазочных магистралях от блоков питателей до подшипниковых узлов роликовых секций.

Результаты исследования показали, что температура свыше 150 °С наблюдается на роликах и подшипниковых узлах первых шести секций. В свою очередь температура свыше 150 °С оказывает негативное влияние на работу всего оборудования МНЛЗ, разрушая уплотнительные узлы подшипниковых опор и способствуя интенсивному старению пластичного смазочного материала, как уплотнительного (там, где используются закрытые подшипники качения), так и непосредственно эксплуатационного Униола 2М. В таблице представлены реологические и физико-химические свойства пластичного смазочного материала Униол 2М

Из таблицы видно, что наиболее подходящий материал для смазывания роликовых секций от централизованной станции — Униол 2М/2, так как известно, что при повышении температуры динамическая вязкость пластичного смазочного материала повышается, а не понижается, как у жидких смазочных материалов.

Однако высокие внешние температуры отрицательно влияют как на Униол 2М/1, так и на Униол 2М/2. Они, приводя к закоксованию смазочных трубопроводов, затрудняют прокачиваемость и снижают стойкость подшипников качения, так как в зоне контакта вязкость базового масла резко снижается, и, как следствие, снижается толщина масляной пленки, а под-

шипники качения работают в режиме сухого трения.

Таким образом, закоксованный смазочный материал способствует разрушению трубопроводов и подшипниковых узлов изнутри, а вода и высокие температуры способствуют их разрушению снаружи, и все это приводит к попаданию в подшипниковые узлы воды, пыли и механических примесей, снижая тем самым реологические и физико-химические свойства пластичных смазочных материалов.

Проверка адекватности полученных результатов осуществлялась на специально разработанной лабораторной установке для моделирования процессов, протекающих в подшипниках качения, а также в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» на подшипниковых узлах роликовых секций МНЛЗ.

По результатам проведенных теоретических исследований разработаны режимы смазывания подшипниковых узлов роликовых секций МНЛЗ при использовании системы смазывания типа «масло — воздух». По результатам теоретических и экспериментальных исследований предложено: осуществлять эксплуатацию системы «масло — воздух» на смазочном материале классом вязкости не ниже 460;

при использовании смазочного материала класса вязкости 460 увеличить период его нагнетания в смесительный модуль до 30 сек;

при использовании смазочного материала класса вязкости 680 увеличить период его нагнетания в смесительный модуль до 45 сек;

поддерживать давление воздуха в системе в диапазоне $0,2-0,4$ атм.

Использование предложенных режимов позволяет снизить износ подшипников и повысить стойкость подшипниковых опор в целом.

Анализ полученных данных показал, что использование пластичного смазочного материала

Реологические и физико-химические свойства пластичного смазочного материала Униол 2М

| Наименование | Температура каплепадения, °С | Пенетрация при 25 °С, $\times 10^{-1}$ мм | Предел прочности при 20 °С, Па | Вязкость при 0 °С и 10с^{-1} , Па·с, (не более) | Коллоидная стабильность, % (не более) | Работоспособность, °С |
|--------------|------------------------------|---|--------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| Униол-2М/1 | ≥ 200 | 280–360 | 250–450 | 800 | 7 | $(-40)-(+160)$ |
| Униол-2М/2 | ≥ 205 | 330–380 | ≥ 410 | 110 | 12 | $(-30)-(+160)$ |

в подшипниковых узлах МНЛЗ приводит к частому заклиниванию роликов из-за закоксовывания смазки. Наиболее перспективным техническим

решением для устранения вышеперечисленных недостатков является, на наш взгляд [5], внедрение систем смазывания типа «масло — воздух».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я. Подшипники качения. Справочник. Изд. 6-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 572 с.
2. Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор. М.: Машиностроение, 1983. 543 с.
3. Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.
4. Мироненков Е.И., Жиркин Ю.В., Дудоров Е.А. Исследование изменения свойств смазочного мате-

риала в подшипниковых узлах рабочих валков чистой группы клетей стана 2000 горячей прокатки ОАО «ММК» // Материалы 64-й научно-технической конференции : сб. докл. / Магн. гос. техн. ун-т. Магнитогорск, 2005. С. 277–279.

5. Мироненков Е.И., Жиркин Ю.В., Дудоров Е.А., Резванов С.Б. Влияние вязкости минеральных масел на температурный режим подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. № 1. С 58–60.

REFERENCES

1. Beyzelman R.D., Tsyppkin B.V., Perel L.Y. Podshipniki kattheniya. Spravochnik. Izd. 6-e, pererab. i dop. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 572 s. (rus.)
2. Perel L.Ya. [Bearings: Calculation, design and maintenancetion supports]. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 543 s. (rus.)
3. Perel L.Y., Filatov A.A. [Bearings: Calculation, design and service support]. Moscow: Mashinostroenie enie, 1992. 608 s. (rus.)
4. Mironenkov E.I., Zhirkin Ju.V., Dudorov E.A. Issledovanie izmenenija svojstv smazochnoho materiala v pod-

shipnikovyh uzлах rabochih valkov chistovoj gruppy kletej stana 2000 gorjachej prokatki ОАО «ММК». *Materialy 64-j nauchno-tehnicheskoy konferencii: sb. dokl.* / Magn. gos. tehn. un-t. — Magnitogorsk, 2005. S. 277–279. (rus.)

5. Mironenko E., Zhirkin Y., Dudorov E., Rezvanov S. Vliyanie vyazkosti mineralnikh masel na temperaturniy regim podchipnikovyx uzlov rabotchikh valkov prokatnykh stanjv. [The effect of viscosity of mineral oils in the temperature regime of bearing units of work rolls of rolling mills]. *Vestnik MGTU imeni G. Nosov.* 2006. № 1. S. 58–59. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТЕРЕНТЬЕВ Дмитрий Вячеславович — кандидат технических наук доцент кафедры машин и технологий обработки давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»; e-mail:ktnterentyev@mail.ru

ПЛАТОВ Сергей Иосифович — доктор технических наук заведующий кафедрой машин и технологий обработки давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

ЖИРКИН Юрий Васильевич — кандидат технических наук профессор кафедры механического оборудования металлургических заводов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

МИРОНЕНКОВ Евгений Иванович — кандидат технических наук доцент кафедры механического оборудования металлургических заводов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

AUTHORS

TERENT'EV Dmitrii V. — Magnitogorsk State Technical University named by Nosov G.I., Russia

PLATOV Sergey I. — Magnitogorsk State Technical University named by Nosov G.I., Russia

ZHIRKIN Yuriy V. — Magnitogorsk State Technical University named by Nosov G.I., Russia

MIRONENKOV Evgeniy I. — Magnitogorsk State Technical University named by Nosov G.I., Russia



МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 621.001.5:331.01

А.Г. Ташевский

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

A.G. Tashevsky

MATHEMATICAL MODELS OF LIFE CYCLE DURATION OF TECHNICAL SYSTEMS

Рассмотрены несколько многопараметрических распределений, сводящихся к экспоненциальному при подходящем выборе одного из параметров в процессе построения математической модели продолжительности жизненного цикла технических систем.

ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА; ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ; ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ; СЛОЖНОЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ; ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СЛУЧАЙНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ; РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГОМ-ПЕРЦА-МАКЕГАМА.

The article considers several multiparameter distributions, reducing to the exponential with a suitable choice of one of the parameters in process of constructing a mathematical models of duration life cycle of technical systems.

TECHNICAL SYSTEM; DISTRIBUTION LAW; LIFE CYCLE; COMPLICATED EXPONENTIAL DISTRIBUTION; EXTREME RANDOM VARIABLES; DISTRIBUTION OF GOMPERTZ-MAKEGAMA.

Масштабность и сложность задач создания и применения современных технических, организационно-технических и других сложных систем сконцентрирована в техноинформационном процессе, который именуют жизненным циклом. Детальный анализ этапов жизненных циклов сложных технических систем показывает необходимость решения различающихся по постановке и используемым методам задач общей теории технических систем. Накоплен большой опыт применения методов анализа и синтеза технических объектов различной структурной и технической сложности. Вместе с тем выявились существенные трудности, препятствующие получению удовлетворительных результатов как теоретическим, так и экспериментальным путем.

Объективно существует потребность разработки специфической методологии системно-информационного анализа и общей теории технических объектов. Основной целью такой методологии должно быть обеспечение наиболее эффективной переработки ограниченного объема информации, которым располагает исследователь, учета фактора неопределенности и стохастичности как объективных условий, в которых происходит процесс управления развитием технических систем на всех этапах их жизненных циклов. Реализация такого подхода позволит придать выявленным закономерностям развития технических систем количественно-качественное содержание и обеспечить их статистическую (вероятностную) интерпретацию.

Содержание работы составляют методы формирования математических моделей, адекватно отражающих конструктивную эволюцию технических систем и процессы их модернизации. Показано, что традиционные модели оценки длительности жизненного цикла (кривые Гомперца, распределение Гомперца — Макегама) в своей основе исходят из идеализированной модели экспоненциального распределения в предположении постоянства его параметра, что неприемлемо для широкого класса технических систем.

Предложена модификация экспоненциальной зависимости и общий способ построения широкого класса моделей жизненного цикла на основе рандомизации параметра экспоненциального распределения и использования аппарата характеристических функций.

Разработан и применен метод формирования математических моделей продолжительности жизненного цикла для технических систем, ретроспективная информация о которых представляет собой короткий динамический ряд (случайная конечная выборка малого объема). Сущность метода заключается в целенаправленном преобразовании пуассоновского потока событий в непуассоновский, адекватный реальному процессу. В качестве аналитического аппарата этого метода использован аппарат теории суммирования случайного числа случайных величин. Показано, что полученные законы распределения продолжительности жизненного цикла относятся к классу неопределенных распределений сумм случайного числа случайных величин, имеют тяжелый «хвост» и большую дисперсию по сравнению с «осредненными» законами распределений, что делает эти модели наиболее ценными для получения надежных оценок продолжительности жизненного цикла.

Уже разработано значительное число математических моделей продолжительности жизненного цикла технических систем и продолжает неуклонно расти.

Теория надежности появилась как следствие возникшей потребности в обеспечении безотказной работы сложных технических систем, в основном стимулированной нуждами военных [1–3, 12, 17].

Новейший период развития этой теории относится к концу прошлого века, когда состоялась первая международная конференция «Ма-

тематические методы в теории надежности (MMR-97)» (Бухарест, Румыния, 1997 г.).

Последующие конференции проходили в Бордо (Франция, 2000), Трондхейме (Норвегия, 2002), Санта Фе (Нью Мехико, США, 2004), Глазго (Шотландия, Великобритания, 2007), Москве (Россия, 2009). По материалам этих конференций опубликованы сборники трудов [22–25].

В настоящее время активно разрабатываются математические модели долговечности, старения и деградации [5, 7, 9–11, 13, 15, 19–21, 26, 27]. Многие из них посвящены моделированию процессов износа и старения сложных биотехнических систем в здравоохранении, при анализе качества жизни и экологической безопасности агрегатов энергетических комплексов.

Существуют активно работающие международные семинары по указанным проблемам [19, 20].

Провести сравнительный анализ различных моделей старения и долговечности в рамках данной статьи в силу трудоемкости и значительно большого объема не представляется возможным. Этим проблемам были посвящены:

Международная конференция по критериям согласия и соответствию моделей (International Workshop GOF2000 on Goodness-of-fit Tests and Validity of Models), Париж;

Международная конференция по моделям долговечности, старения и деградации (LAD'2004), Санкт-Петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург.

В анализе данных типа продолжительности жизненного цикла особенно интересны технические системы, для которых может быть определено событие, часто называемое отказом. Отказ происходит после некоторого интервала времени (наработки до отказа).

С сентября 2010 года в РФ введен в действие национальный стандарт — ГОСТ Р 27.004–2009 «Надежность в технике. Модели отказов» [18]. Он распространяется на изделия любых видов техники, для которых предусматривают и решают задачи прогнозирования безотказности и обработки статистических данных об отказах на различных стадиях их жизненного цикла.

Этот стандарт устанавливает модели отказов невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий с простым техническим обслуживанием

и ремонтом, проводимым на месте эксплуатации данных изделий. Стандарт не распространяется на сложные восстанавливаемые изделия, безотказность которых существенно связана с количеством и чередованием режимов функционирования, наличием и способами резервирования составных частей, разнообразием способов их технического обслуживания и ремонта.

Для точного определения наработки до отказа необходимо выполнить три условия: четко установить начало отсчета времени; выбрать масштаб для измерения отсчета времени и определить само понятие отказа. Будем считать отказом момент времени, когда некоторая характеристика (параметр) технической системы, измеряемая каким-либо количественным способом, падает ниже допустимого уровня, определенного техническими условиями (условиями функционирования). В самом общем случае это может быть момент времени, когда обобщенный показатель технического уровня системы станет меньше значения нижней доверительной границы прогнозируемого мирового технического уровня систем-аналогов.

Таким образом, объект исследования сопоставляется с единственной неотрицательной случайной величиной T , представляющей собой эффективный срок жизни системы. Тогда функция «выживания», соответствующая T , определится как вероятность того, что время жизни (наработка) окажется больше t :

$$F(t) = \text{Вер} (T \geq t), \text{ или } F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt.$$

Иследуем некоторые распределения, полезные для решения рассматриваемого класса задач.

Наиболее простое аналитическое выражение имеет вид экспоненциального распределения с плотностью вероятностей

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Постоянная интенсивности λ отражает свойство экспоненциального распределения, названное отсутствием последействия, т. е. при любом $t_0 > 0$ условное распределение $T - t_0$ при условии, что $T > t_0$, совпадает с безусловным распределением T .

Коэффициент вариаций, т. е. отношение стандартного отклонения к среднему, равен единице, и его можно использовать в качестве относительного разброса.

Постановка проблемы и пути ее решения

Экспоненциальное распределение широко применяется в работах по надежности, к нему приводят различные идеализированные модели. Однако в связи с тем, что это распределение определяется только одним параметром, основанные на нем методы часто оказываются чувствительными даже к незначительным отклонениям «хвоста» распределения. Поэтому рассмотрим несколько многопараметрических распределений, сводящихся к экспоненциальному при подходящем выборе одного из параметров.

Сложно-экспоненциальное распределение. Обозначим длительность периода жизненного цикла t . Очевидно, что t — случайная величина, которая зависит от ряда экзогенных факторов. Область существования такой случайной величины может быть задана только одним ограничением, а именно ограничением в интервале $(0, \infty)$.

По принципу Джейнса «минимальным произволом» обладает экспоненциальное распределение, поэтому целесообразно представить

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

где $\lambda = 1/\bar{t}$.

Однако предположение о постоянстве параметра λ нереалистично. Это обусловлено причинами кумулятивного характера. Кроме того, величина параметра λ в значительной мере зависит от объема выборки (как правило, исследователь имеет в распоряжении выборку малого объема), а также от типа технической системы. Можно принимать параметр λ в качестве случайной величины с плотностью вероятности $f(\lambda)$. Тогда

$$f(t) = \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} f(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

В простейшем случае вариация параметра λ имеет γ -распределение

$$f(\lambda) = \frac{1}{\Gamma(k)} \rho^k \lambda^{k-1} e^{-\rho \lambda}, \quad (3)$$

где k — параметр формы, $k = \bar{\lambda}^2 / S^2$; $1/\rho$ — параметр масштаба, $\rho = \bar{\lambda} / S^2$; $\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i$; $\lambda_i = \frac{1}{t_i}$; $1 = \bar{1}, n$; \bar{t}_i — средняя длительность жизненного цикла i -го типа технической системы.

Распределение (3) характеризуется гибкостью, поскольку оно имеет два подгоночных параметра. Принимая $\rho = k / \bar{\lambda}$, $\bar{\lambda} = \lambda_0$, получим

$$f(t) = \int_0^{\infty} \lambda e^{-t\lambda} \frac{1}{\Gamma(k)} \left(\frac{k}{\lambda_0} \right)^k \lambda^{k-1} e^{-\lambda \lambda_0} d\lambda.$$

Решив интеграл, определим плотность вероятности сложно-экспоненциального распределения

$$f(t) = k \left(\frac{k}{\lambda_0} \right)^k \left(\frac{k}{\lambda_0} + t \right)^{-k-1}$$

и интегральный закон распределения

$$F(t) = \int_0^{\infty} \frac{k \left(k / \lambda_0 \right)^k}{\left(\frac{k}{\lambda_0} + t \right)^{k+1}} dt = 1 - \frac{\left(k / \lambda_0 \right)^k}{\left(t + k / \lambda_0 \right)^k}.$$

Этот закон является модификацией распределения Парето. Его дисперсия превышает дисперсию того предельного экспоненциального распределения, к которому оно сходится при $k \rightarrow \infty$. Графики полученных зависимостей представлены на рис. 1 и 2.

Распределение Гомперца — Макегама. Теперь предположим, что параметр интенсивности экспоненциального распределения имеет временной тренд, который может быть описан уравнением модифицированной экспоненты. В этом случае интенсивность будет определяться двумя составляющими: константой a , не зависящей от длительности жизненного цикла технической системы, и слагаемым, экспоненциально растущим с «возрастом»:

$$\lambda(t) = a + b \exp(\lambda t). \quad (4)$$

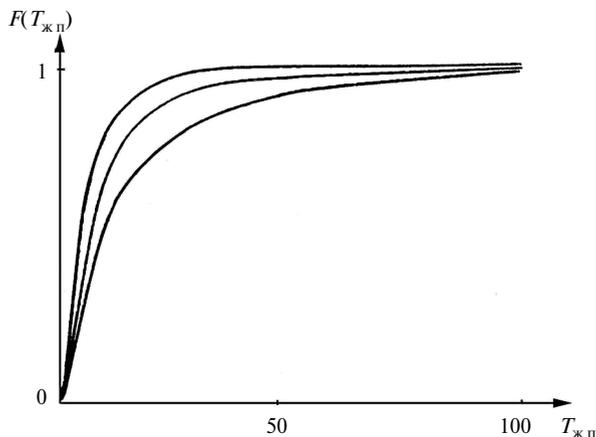


Рис. 1. Интегральный закон распределения

Эта функция, постоянные которой a , b и λ распределяются статистически на основе известных алгоритмов (например, методом трех сумм или методом трех точек) имеет горизонтальную асимптоту, равную a . Ее график стремится к асимптоте при $t \rightarrow \infty$ но никогда ее не пересекает. Параметр b равен разности между ординатой кривой (при $t = \infty$) и асимптотой. Тогда, подставляя выражение (4) в зависимость (1), получим

$$f(t) = \left(a + b e^{\lambda t} \right) e^{-at - \frac{b}{\lambda} \left(e^{\lambda t} - 1 \right)}. \quad (5)$$

Это дифференциальный закон распределения Гомперца — Макегама. Его частным случаем при $a = 0$ (то есть в случае представления уравнения тренда интенсивности простой экспонентой) является распределение Гомперца. Последнее при прогнозировании длительности жизненного цикла технических систем представляют особый интерес, т. к. является стохастическим аналогом кривой Гомперца (Бенджамин Гомперц, 1799—1865, — английский математик). Принимая во внимание его асимметричность, его широко применяют при аппроксимации статистических данных тренда развития сложных технических систем.

Распределение Гомперца — Макегама пользуется возрастающим вниманием специалистов. Рассмотрим один из моделирующих алгоритмов, позволяющих получать случайные величины, распределенные по этому закону.

Моделирующий алгоритм для получения случайных величин, распределенных по закону Гомперца-Макегама

Для построения необходимого алгоритма был использован метод операторных рядов, позволяющий, употребив известную теорему, представить заданную случайную величину в виде

$$X = \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(Y + y_0)^v}{v!} D_x^v \Big|_{x_0}, \quad (6)$$

где Y — случайная величина, равномерно распределенная на интервале $(0, 1)$; D_x^v — оператор преобразования v -го порядка вида

$$D_x^v = \frac{1}{\phi(x)} \frac{d}{dx} \quad (7)$$

со следующими свойствами:

$$D_x^{v+1} = D(D_x^v); \quad D_x^0 = X_0; \quad D_x^1 = \frac{1}{\phi(x)},$$

где $\phi(x)$ — заданная функция распределения искомой случайной величины; $y_0 = \phi(x_0)$ — значение функции в выбранной опорной точке x_0 , в которой $\phi(x_0) \neq 0$.

Распределение Гомперца — Макегамы анализировалось в виде

$$g(x) = a + be^{-\frac{ax+b}{\lambda}(e^{\lambda x}-1)}, \quad (8)$$

где a, b, λ — некоторые константы при $x \geq 0$.

Выбрав опорную точку $x_0 = 0$ и используя выражение (7), можно получить первые пять членов операторного ряда:

$$D = \frac{e^{\frac{ax+b}{\lambda}e^{\lambda x-1}}}{a + be^{\lambda x}} \frac{d}{dx};$$

$$D_{x_0}^0 = 0;$$

$$D_x^1 = \frac{e^{\frac{ax+b}{\lambda}e^{\lambda x-1}}}{a + be^{\lambda x}} \Big|_{x_0} = \frac{e^{b/\lambda e}}{a + b};$$

$$D_x^2 = (D_x^1)^2 \left[a + be^{\lambda x-1} - \frac{b\lambda e^{\lambda x}}{a + be^{\lambda x}} \right] \Big|_{x_0} = (D_{x_0}^1)^2 \left[a + \frac{b}{e} - \frac{b\lambda}{a + b} \right];$$

$$D_x^3 = (D_x^1)^3 \times$$

$$\times \left[2 \left(a + be^{\lambda x-1} - \frac{b\lambda e^{\lambda x}}{a + be^{\lambda x}} \right)^2 + b\lambda e^{\lambda x-1} - \frac{ab\lambda^2 e^{\lambda x}}{(a + be^{\lambda x})^2} \right] \Big|_{x_0} = (D_{x_0}^1)^3 \left[2 \left(a + \frac{b}{e} - \frac{b\lambda}{a + b} \right)^2 + \frac{b\lambda}{e} - \frac{ab\lambda^2}{(a + b)^2} \right];$$

$$D_x^4 = (D_x^1)^4 \left[6 \left(a + be^{\lambda x-1} - \frac{b\lambda e^{\lambda x}}{a + be^{\lambda x}} \right)^3 + 7 \left(a + be^{\lambda x-1} - \frac{b\lambda e^{\lambda x}}{a + be^{\lambda x}} \right) \left(b\lambda e^{\lambda x-1} - \frac{ab\lambda^2 e^{\lambda x}}{a + be^{\lambda x}} \right) \right] \Big|_{x_0} =$$

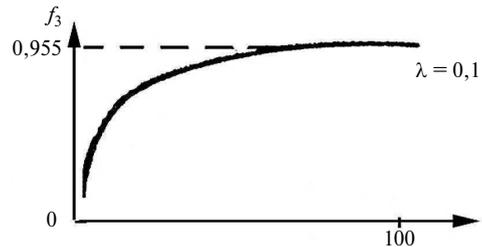
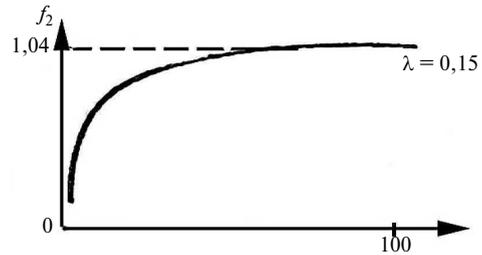
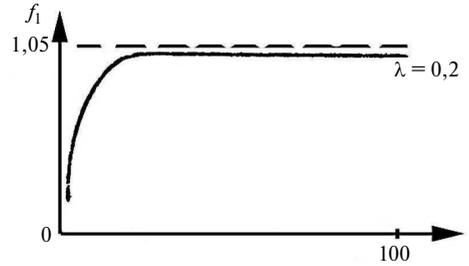


Рис. 2. Интегральный закон распределения

$$+ b\lambda^2 e^{\lambda x-1} - \frac{ab\lambda^3 e^{\lambda x} (a - be^{\lambda x})}{(a + be^{\lambda x})^3} \Big|_{x_0} = (D_{x_0}^1)^4 \left[6 \left(a + \frac{b}{e} - \frac{b\lambda}{a + b} \right)^3 + 7 \left(a + \frac{b}{e} - \frac{b\lambda}{a + b} \right) \times \left(\frac{b\lambda}{e} - \frac{ab\lambda^2}{(a + b)^2} \right) + \frac{b\lambda^2}{e} - \frac{ab\lambda^3 (a - b)}{(a + b)^3} \right].$$

Путем использования этих выражений и выражения (6) получен алгоритм и смоделирована случайная величина для конкретных a, b и λ .

Двойное экспоненциальное распределение экстремальных случайных величин. При прогнозировании длительности жизненного цикла технических систем встречаются задачи, связанные с экстремальными (максимальными или минимальными) значениями из некоторого набора случайных величин. Наиболее наглядной из них является задача о времени внедрения (длительности реализационного периода жизненного

цикла) технической системы, состоящей из n однотипных модулей. Если t_i — время внедрения i -го модуля, то время, равное длительности реализационного периода системы, определяется самым протяженным лагом внедрения, т. е. равно максимуму:

$$T_n = \max(t_1, \dots, t_n).$$

Классическая теория экстремальных значений в основном имеет дело со свойствами распределения максимума n независимых и одинаково распределенных случайных величин.

Более подробно данный вопрос рассмотрен в [2], где показано, что экстремальные распределения экстремальных случайных величин имеют одну из следующих трех экспоненциальных форм, называемых тремя распределениями экстремальных значений:

тип 1 — $g(x) = \exp(-e^{-x})$ при $-\infty < x < \infty$;

тип 2 — $g(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0, \\ \exp(-x^{-\alpha}) & \text{для } \alpha > 0 \text{ и } x > 0; \end{cases}$

тип 3 — $g(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \geq 0; \\ \exp(-(x)^{\alpha}) & \text{для } \alpha > 0 \text{ и } x \leq 0. \end{cases}$

Продолжая рассматривать семейство экспоненциальных распределений, приведем алгоритм моделирования двойного экспоненциального распределения экстремальных случайных величин, имеющего следующую плотность вероятностей (частный случай распределения типа I):

$$g(x) = -\frac{\alpha}{E_i(1/\lambda)} \exp\left[-\frac{1}{\lambda} \exp(\alpha x)\right] \text{ для } x \geq 0,$$

где α, λ — параметры распределения; E_i — интегральная показательная функция.

Данное распределение имеет максимум $E[\exp(\alpha x)]$ при заданной энтропии. Для выбранных значений $\alpha = 1$ и $\lambda = 1$ выражение для плотности распределения имеет следующий вид:

$$g(x) = \exp[-\exp(x)] / 0,2194.$$

Тогда оператор

$$D = \frac{d}{dx} g(x) = k \exp[\exp(x)] d / dx, \quad (9)$$

где $k = 0,2194$.

Поскольку $g(0) \neq 0$, то в качестве опорной точки целесообразно выбрать $x_0 = 0$. В соответствии с формулой (9) получим

$$D_x^1 = k \exp(x) \Big|_{x_0=0} = ke;$$

$$D_x^2 = k^2 \exp[2 \exp(x) + x] \Big|_{x_0=0} = (ke)^2;$$

$$D_x^3 = k^3 \exp[3 \exp(x) + x] [2 \exp(x) + 1] \Big|_{x_0=0} = 3(ke)^3;$$

$$D_x^4 = k^4 \exp[4 \exp(x) + x] \times [6 \exp(2x) + 7 \exp(x) + 1] \Big|_{x_0=0} = 14(ke)^4 \dots \text{ и т. д.}$$

Нетрудно заметить, что в общем случае

$$D_x^v \Big|_{x_0=0} = k^v \exp[v \exp(x) + x] \varphi_v(x) \Big|_{x_0=0} = (ke)^v \varphi_v(0),$$

где $\varphi_v(x)$ — полином степени $(v-2)$, определяемый из следующего рекуррентного соотношения:

$$\varphi_{v+1}(x) = \varphi_v(x) + [v \exp(x) + 1] \varphi_v(x),$$

где $\varphi_1(x) = \varphi_2(x) = 1$, получаемого в результате последовательного применения оператора (I) к $(v+1)$ -му члену разложения операторного ряда:

$$\begin{aligned} D_x^{v+1} &= D(D_x^v) = \\ &= k \exp[\exp(x)] \frac{d}{dx} \{k^v \exp[v \exp(x) + x] \varphi_v(x)\} = \\ &= k^{v+1} \exp[\exp(x)] \{ \exp[v \exp(x) + x] \varphi_v(x) + \\ &+ \exp[v \exp(x) + x] [v \exp(x) + 1] \varphi_v(x) \} = \\ &= k^{v+1} \exp[(v+1) \exp(x) + x] \varphi_{v+1}(x). \end{aligned}$$

Если ограничиться несколькими первыми членами ряда, то моделирующий алгоритм при условии выбора начальной точки $x_0 = 0$ примет следующий вид

$$\begin{aligned} x &= \alpha ke / 1! + (\alpha ke)^2 / 2! + 3(\alpha ke)^3 / 3! + \\ &+ 14(\alpha ke)^4 / 4! + 89(\alpha ke)^5 / 5! \dots, \end{aligned}$$

где α — случайная величина, равномерно распределенная в интервале $(0, 1)$.

Далее приведен один из возможных вариантов программы, реализующий этот алгоритм.

Результаты решения в виде графика плотности распределения и гистограммы приведены в [3].

Для реализации моделирующего алгоритма, приведенного выше, используется процедура VNL1, написанная на языке PL/I для платформ Windows [4]. Кратко рассмотрим порядок работы этой программы.

Операторы с первого по пятый производят описание типа используемых переменных и внешних процедур:

RANDU — датчик случайных чисел, равномерно распределенных в интервале (0, 1); IX, IY, R — параметры внешней процедуры RANDU; N — количество разыгрываемых случайных чисел (R_i); X — переменная (аргумент функции $g(x)$); G — функция $g(x)$; K — вспомогательная переменная, используемая для упрощения расчета величины x ; B — вспомогательная переменная, применяющаяся для оцифровки осей координат графика; C, D — вспомогательные переменные для вычисления номеров соответственно столбца и строки в символьном массиве GRAF, где хранятся значения $g(x)$.

Оператор 6 осуществляет ввод числа N, а оператор 7 обеспечивает построение оси ординат.

Непосредственные расчеты величин K, X, G, C и D осуществляют операторы с 8 по 13, после чего полученные значения выводятся на печать (операторы 14–29).

Детерминистская схема решения задачи определения длительности жизненного цикла технических систем. Детерминистский подход базируется на дальнейшей трансформации математической модели, используемой для определения периода упреждения прогноза. В основу этой модели положены ретроспективные данные.

Не нарушая общности рассуждений, можно считать, что элементарное приращение продолжительности жизненного цикла технической системы ΔT будет пропорционально абсолютному (полному) периоду T , приращению показателя, характеризующего технический уровень ΔQ и некоторой функции $F(Q)$, зависящей от изменения технического уровня во времени t . Таким образом,

$$\Delta T = TF(Q)\Delta Q. \quad (10)$$

Исходя из того, что любой образец в процессе своего развития и совершенствования достигает предела, можно заключить: при достаточно большом времени t , приближающемся

к длительности жизненного цикла T , значение функции $F(Q)$ стремится к 0 или постоянной величине, т. е.

$$\lim_{t \rightarrow T} F(Q) = 0.$$

Этому условию соответствует функция

$$F(Q) = 1 - Q, \quad (11)$$

когда при $t \rightarrow T$ нормированное значение технического уровня стремится к своему максимуму, т. е. к единице.

Переходя в (10) от приращений к дифференциалам и учитывая (11), получим дифференциальное уравнение для определения продолжительности жизненного цикла образца в зависимости от его технического уровня:

$$\frac{dT}{T} = (1 - Q)dQ. \quad (12)$$

Решение этого уравнения имеет следующий вид:

$$\ln T = Q - \frac{1}{2}Q^2 + \ln C.$$

При условии, что новая техническая система создается на уровне прототипа, ее жизненный цикл практически не будет отличаться от жизненного цикла, который имела система-прототип. Постоянная C может быть найдена из условия $Q = Q_0$ при $T = T_0$, где Q_0 и T_0 — показатели соответственно технического уровня и продолжительности жизненного цикла прототипа.

В этом случае

$$\ln C = \ln T_0 - Q_0 + Q_0^2/2;$$

$$T = T_0 \exp\left[Q - 0,5Q^2 + Q_0(0,5Q_0 - 1)\right].$$

Если нормирование показателя технического уровня произвести по отношению к значению Q , то последнее выражение примет вид

$$T = T_0 \exp\left[0,5 + Q_0/Q(0,5Q_0/Q - 1)\right].$$

Таким образом, мы получим детерминистский аналог одного из распределений семейства экспоненциальных.

В качестве примера определим прогнозное значение длительности жизненного цикла технической системы, имеющей нормированный показатель технического уровня, равный 0,9, при условии, что прототип характеризуется сле-

дующими параметрами: $Q_0 = 0,2$ и $T_0 = 9$ лет. Тогда

$$T = 9 \exp \left[0,5 + 0,2 / 0,9 (0,5 \cdot 0,2 / 0,9 - 1) \right] = 12 \text{ лет.}$$

Экспоненциальное распределение широко применяется в работах по надежности, к нему приводят различные идеализированные модели. Однако в связи с тем, что это распределение определяется только одним параметром, основанные на нем методы часто оказываются чувствительными даже к незначительным отклонениям «хвоста» распределения.

Рассмотренные в статье многопараметрические распределения позволяют создавать более корректные модели жизненного цикла технических систем, сводящиеся к экспоненциальному

распределению при подходящем выборе одного из параметров.

Приведен эффективный алгоритм моделирования двойного экспоненциального распределения экстремальных случайных величин, получено дифференциальное уравнение для определения продолжительности жизненного цикла образца в зависимости от его технического уровня.

Разработан моделирующий алгоритм для получения случайных величин, распределенных по закону Гомперца — Макегама.

Для подтверждения основных положений статьи рассмотрен пример определения прогнозного значения длительности жизненного цикла технической системы, имеющей нормированный показатель технического уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мартыщенко Л.А., Ташевский А.Г.** Военно-научные исследования и разработка вооружения и военной техники. Ч. II. Л.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1993. 253 с.
2. **Мартыщенко Л.А.** Экстремальные распределения экстремальных случайных величин. Л.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1989. 40 с.
3. **Ташевский А.Г., Голик Е.С.** Модели расчета длительности жизненного цикла технических систем. Л.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1991. 26 с.
4. **Фролов Г.Д., Олюнин Б.Ю.** Практический курс программирования на языке PL/1.— М: Наука, 1983. 384 с.
5. **Антонов А.В., Никулин М.С.** Статистические модели в теории надежности.— М.: Изд-во «Абрис», Высшая школа, 2014. 392 с.
6. **Ушаков И.А., Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. [и др.].** Надежность технических систем: Справочник. М: Радио и связь, 1985. 608 с, ил.
7. **Никулин М.С., Анисимов В.Н., Никулин А.М.** Статистические модели долговечности, старения и деградации в демографии, геронтологии и онкологии // Успехи геронтологии. 2011. №3. С. 366–379.
8. **Ташевский А.Г., Петров В.М.** Оценка продукции судостроения по результатам оперативного контроля технологического процесса // Труды V междунар. симпозиума по транспортной триботехнике «Транс-трибо — 2013». 10–11 октября. Санкт-Петербург, СПб.: Изд-во ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 2013. С. 53–58.
9. **Ташевский А.Г.** Основные понятия и показатели износостойкости и надежности деталей машин.— СПб.: Изд-во института машиностроения, 2008. 44 с., ил.
10. **Рябинин И.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2007.— 278 с.
11. **Ташевский А.Г.** Верификация результатов испытаний сложных технических систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2 (171). С. 203–210.
12. **Мартыщенко Л.А., Ташевский А.Г., Немчинов В.И.** Подтверждение ТТХ сложных систем по малому числу испытаний / МО СССР. 1985. 48 с.
13. **Ташевский, А.Г.** Интерпретация результатов испытаний после модернизации систем энергомашиностроения // Инструмент и технологии. 2012. № 36. С. 34–39.
14. **Ташевский А.Г.** Метод оценки надежности сложных изделий энергомашиностроения при ограниченном числе испытаний // Труды Санкт-Петербургского института машиностроения. 1996. Вып. 2. 96 с.
15. **Ташевский А.Г.** Модели аварийных ситуаций для обеспечения безопасности функционирования сложных технических систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1 (166). С. 256–263.
16. **Ташевский А.Г., Мартыщенко Л.А.** Корректировка математических моделей сложных технических систем по результатам комплексных испытаний. Л.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1990. 60 с.
17. **Ташевский А.Г., Мартыщенко Л.А.** Экспресс-оценка показателей эффективности сложных систем по результатам ограниченного числа натуральных испытаний и исследовательских учений // Оборонная техника. 1989. № 12. С. 37–48.

18. **ГОСТ Р 27.004–2009** Надежность в технике. Модели отказов. М.: Стандартинформ, 2010.
19. Математические методы теории надежности (MMR-2009): Сб. докл. VI международной конференции. 7–9 июня 2004 г. С.-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический государственный университет. СПб., 2004.
20. Математические методы в теории надежности. Теория. Методы. Приложения. Москва: Изд-во Российского ун-та дружбы народов, 2009.
21. **Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б., Никулин М. С., Сааидиа Н.** Моделирование распределений статистик непараметрических критериев согласия при проверке сложных гипотез относительно обратного гауссовского закона // *Автоматика и телемеханика*, 2010. № 7. С. 83–102.
22. Statistical and Probabilistic Models in Reliability // *Proceedings of the International Conference on Mathematical Methods in Reliability*. Bucharest, Romania / Eds. Ionescu D., Limnios N. Birkhauser: Boston, Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics. 1999.
23. Recent Advances in Reliability Theory, Methodology Practice and Inference // *Proceedings of the Second International Conference on Mathematical Methods in Reliability*. Bordeaux, France / Eds. N. Limnios, M. Nikulin. Birkhauser: Boston. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics. 2000.
24. Mathematical and Statistical Methods in Reliability // *Proceedings of the Third International Conference on Mathematical Methods in Reliability*. Trondheim, Norway / Eds. Lindqvist B., Kjell A. Doksum., World Scientific Publishing: Boston // Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, 2003. Vol. 7.
25. Modern Statistical and Mathematical Methods in Reliability / Eds. N. Limnios, S. Keller-McNulty, Y. Armijo. World Scientific Publishing: Boston // Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics. 2005. Vol. 10.
26. **Nikulin M., Gerville-Reache L. Couallier V.** *Statistique des essais acceleres*. London: Hermes. 2007.

REFERENCES

1. **Martyshhenko L.A., Tashevskij A.G.** *Voenno-nauchnye issledovaniya i razrabotka vooruzheniya i voennoj tekhniki*. CH. II. L.: Izd-vo Ministerstva oborony SSSR, 1993. 253 s. (rus.)
2. **Martyshhenko, L.A.** *Ekstremal'nye raspredeleniya ehkstreml'nykh sluchajnykh velichin*. L.: Izd-vo Ministerstva oborony SSSR, 1989. 40 s. (rus.)
3. **Tashevskij A.G., Golik E.S.** *Modeli raschyota dlitel'nosti zhiznennogo tsikla tekhnicheskikh sistem*. L.: Izd-vo Ministerstva oborony SSSR, 1991. 26 s. (rus.)
4. **Frolov, G.D., Olyunin B.Yu.** *Prakticheskij kurs programmirovaniya na yazyke PL/I*. M: Nauka, 1983. 384 s. (rus.)
5. **Antonov A.V., Nikulin M.S.** *Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti*. M.: Izd-vo Abris, Vysshaya shkola, 2014. 392 s. il. (rus.)
6. **Ushakov, I.A. Belyaev, Yu.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V. [i dr.]**. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: Spravochnik*. M: Izd-vo Radio i svyaz', 1985. 608 s, il. (rus.)
7. **Nikulin M.S., Anisimov V.N., Nikulin A.M.** *Statisticheskie modeli dolgovechnosti, stareniya i de-gradatsii v demografii, gerontologii i onkologii. Uspekhi gerontologii*. 2011. №3. S. 366–379. Bibl. 56 nazv. (rus.)
8. **Tashevskij A.G., Petrov V.M.** *Otsenka produktsii sudostroeniya po rezul'tatam ope-rativnogo kontrolya tekhnologicheskogo protsessa. Trudy pyatogo mezhdunarodnogo simpoziuma po transportnoj tribotekhnike «Trans-tribo-2013»*. 10–11 oktyabrya. 2013. Sankt-Peterburg: Izd-vo FGBOU VPO «Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota ime-ni admirala S.O. Makarova», 2013. S. 53–58. (rus.)
9. **Tashevskij A.G.** *Osnovnye ponyatiya i pokazateli iznosostojkosti i nadyozhnosti detalej mashin*. SPb.: Izd-vo instituta mashinostroeniya, 2008. 44s., il. (rus.)
10. **Ryabinin I.A.** *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem*. SPb.: Izd-vo SPb universiteta, 2007. 278 s. (rus.)
11. **Tashevskij A.G.** *Verifikatsiya rezul'tatov ispytaniy slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013. № 2(171). S. 203–210. (rus.)
12. **Martyshhenko L.A., Tashevskij A.G., Nemchinov V.I.** *Podtverzhdenie TTKH slozhnykh sistem po malomu chislu ispytaniy/ MO SSSR*. 1985. 48 s. (rus.)
13. **Tashevskij A.G.** *Interpretatsiya rezul'tatov ispytaniy posle moder-nizatsii sistem ehnergomashinostroeniya, Instrument i tekhnologii*. 2012. № 36. S. 34–39 (rus.)
14. **Tashevskij A.G.** *Metod otsenki nadezhnosti slozhnykh izdelij ehnergo-mashinostroeniya pri ogranichenom chisle ispytaniy. Trudy Sankt-Peterburgskogo instituta mashinostroeniya*. SPb., 1996. Vyp. 2. 96 s. (rus.)
15. **Tashevskij A.G.** *Modeli avariynykh situatsiy dlya obespecheniya bezopasnosti funkcionirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013. № 1 (166). S. 256–263. (rus.)
16. **Tashevskij A.G., Martyshhenko L.A.** *Korrektirovka matematicheskikh modeley slozhnykh tekhnicheskikh sistem po rezul'tatam kompleksnykh ispytaniy*. L.: Izd-vo Ministerstva oborony SSSR, 1990. 60 s. (rus.)
17. **Tashevskij A.G., Martyshhenko L.A.** *EHkspress-otsenka pokazatelej ehffektivnosti slozhnykh sistem po rezul'tatam ogranichennogo chisla naturnykh ispytaniy i issledovatel'skikh uchenij. Oboronnaya tekhnika*, 1989. № 12. S. 37–48. (rus.)

18. **GOST R 27.004–2009.** Nadezhnost' v tekhnike. Modeli otkazov. M.: Standartinform, 2010. (rus.)
19. Matematicheskie metody teorii nadezhnosti (MMR-2009). VI mezhdunarodnaya konferentsiya. 7–9 iyunya 2004. S.-Peterburg, Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii gosudarstvennyy universitet. (rus.)
20. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. Teoriya. Metody. Prilozheniya. Izd-vo Rossijskogo un-ta družby narodov, 2009. (rus.)
21. **Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Nikulin M.S., Saaidia N.** Modelirovanie raspredeleniy statistik neparametricheskikh kriteriev soglasiya pri proverke slozhnykh gipotez odnositel'no obratnogo gaussovskogo zakona. *Avtomatika i telemekhanika*, 2010. № 7. S. 83–102. (rus.)
22. Statistical and Probabilistic Models in Reliability. *Proceedings of the International Conference on Mathematical Methods in Reliability*. Bucharest, Romania / Eds. D. Ionescu, N. Limnios. Birkhauser: Boston. *Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics*. 1999. (rus.)
23. Recent Advances in Reliability Theory, Methodology, Practice and Inferences. *Proceedings of the Second International Conference on Mathematical Methods in Reliability*. Bordeaux, France / Eds. N. Limnios, M. Nikulin. Birkhauser: Boston. *Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics*. 2000. (rus.)
24. Mathematical and Statistical Methods in Reliability. *Proceedings of the Third International Conference on Mathematical Methods in Reliability*. Trondheim, Norway / Eds. B. Lindqvist, Kjell A. Doksum. World Scientific Publishing: Boston. *Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics*. 2003. Vol. 7. (rus.)
25. Modern Statistical and Mathematical Methods in Reliability / Eds. N. Limnios, S. Keller-McNulty, Y. Armijo. World Scientific Publishing: Boston. *Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics*. 2005. Vol. 10. (rus.)
26. **Nikulin M., Gerville-Reache L. Couallier V.** Statistique des essais acceleres. Hermes: London, 2007. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ТАШЕВСКИЙ Арнольд Германович — доктор технических наук профессор кафедры автоматизации технологических комплексов и процессов института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195197, Полюстровский пр., д. 14, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: taarnold@yandex.ru

AUTHOR

TASHEVSKY Arnold G. — St. Petersburg State Polytechnical University, Institute of mechanical engineering (LMZ-VTUZ); 195197, Polyustrovsky pr., 14, St. Petersburg, Russia; e-mail: taarnold@yandex.ru



УДК 62–64/662.99:53.04:62–71

А.Л. Куранов, А.В. Корабельников, А.М. Михайлов

КОНВЕРСИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

A.L. Kuranov, A.V. Korabelnikov, A.M. Mikhaylov

CONVERSION OF HYDROCARBON FUEL IN AIRCRAFT THERMAL PROTECTION ELEMENTS

В статье описано экспериментальное исследование возможностей термохимического реактора паровой конверсии углеводородного топлива как элемента теплозащиты. Проведено экспериментальное исследование одиннадцати стационарных режимов течения химически реагирующей смеси с высокой степенью конверсии. Рассчитаны величины теплового потока и степени конверсии. Определены величины удельного теплопоглощения и степень использования хладоресурса.

РЕГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛА; ПАРОВАЯ КОНВЕРСИЯ; ЭНДОТЕРМИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО; ТЕПЛОЗАЩИТА; ОХЛАЖДЕНИЕ; ГИПЕРЗВУКОВЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ.

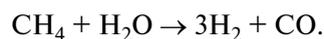
The paper describes hydrocarbon fuels steam reforming thermochemical reactor as a heat protection element experimental study. Studies of 11 stationary regimes of chemically reacting flow with a high degree of conversion were done. The values of heat flow and the degree of conversion were calculated. The values of the specific heat absorption and cooling capacity degree of use were determined.

HEAT RECOVERY; STEAM CONVERSION; ENDOTERMIC FUEL; HEAT PROTECTION; COOLING; HYPERSONIC AIRCRAFT.

В последние годы многие промышленно развитые страны активизировали работы по созданию гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) на углеводородном топливе [1]. В таких аппаратах использование углеводородного топлива возможно только после его преобразования — конверсии — перед подачей в камеру сгорания [2]. При конверсии углеводородного топлива образуется водородсодержащий газ, улучшающий экологические и энергетические характеристики горения. В элементах теплозащиты камеры сгорания и особо теплонапряженных участках обшивки планера используют реакции конверсии, обладающие значительным эндотермическим эффектом (до 200 кДж/моль).

Элементы теплозащиты представляют собой термохимические реакторы (ТХР), в которых протекают различные химические процессы. В данной работе рассмотрена каталитическая реакция паровой конверсии метана (основной

компонент разложения жидкого углеводородного топлива — керосина) [3]:



Использование метана в качестве компонента реакции паровой конверсии позволяет оценить предельные возможности ТХР по теплопоглощению и количеству получаемого водорода [4].

Исследовательский стенд

Стенд паровой конверсии метана предназначен для экспериментального исследования возможностей функционирования ТХР в качестве элемента теплозащиты в условиях воздействия стационарных и нестационарных тепловых потоков с целью определить предельное теплопоглощение, эксплуатационные характеристики ТХР и показатели процесса паровой конверсии, а также предложить оптимальные конструкции и технологию изготовления ТХР с применением планарных и каркасных ката-

лизаторов и средств интенсификации тепло-массообмена.

Принципиальная схема стенда, на котором проводились исследования паровой каталитической конверсии метана, представлена на рис. 1. Стенд состоит из пяти основных узлов: опытного термохимического реактора 6; дугового плазменного нагревателя (плазмотрона) 5; испарителя воды 1 с электронагревателем 2; электронагревателя пара 3; электронагревателя природного газа 4.

Наиболее теплонапряженным узлом установки является дуговой подогреватель ЭДП-109М. Его максимальная мощность составляет 200 кВт. Плазмотрон имеет широкий диапазон регулирования по мощности (от 15 до 200 кВт) [5].

Для подачи в реактор установки водяного пара с заданным расходом используется специальный испаритель. Вышедший из испарителя пар поступает в электронагреватель, в котором происходит его нагрев до температуры 500–700 °С. Этот нагрев осуществляется прямым пропусканием тока через змеевик, по которому проходит пар.

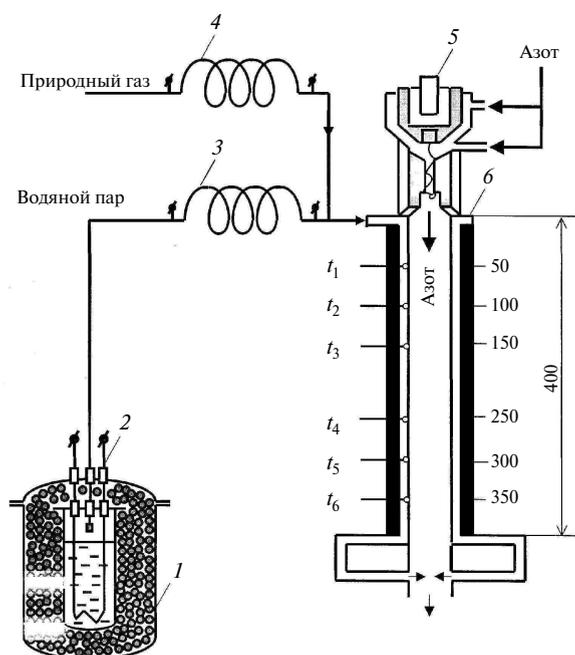


Рис. 1. Принципиальная схема стенда с термохимическим реактором:

- 1 — испаритель воды; 2 — электронагреватель испарителя;
- 3 — электронагреватель пара; 4 — электронагреватель метана;
- 5 — плазмотрон; 6 — термохимический реактор

Метан перед подачей в реактор нагревается до 300–400 °С в змеевике, через который пропускается электрический ток, после чего он смешивается с перегретым паром и смесь поступает во входной коллектор реактора. Продукты конверсии из реактора по шести трубкам направляются во внутренний канал установки в высокотемпературную струю азота. При смешении этой струи с воздухом на выходе из установки продукты конверсии сгорают.

На стенде для тепловых испытаний ТХР были оборудованы две газоаналитические системы. Первой системой служит система отбора проб в пробоотборные бачки за счет предварительного созданного в них глубокого разряжения. Далее в пробоотборные бачки нагнетается аргон. Анализ состава отобранного газа производится с использованием аттестованного хроматографа.

Второй — эта система непрерывного масс-спектрометрического анализа в течение эксперимента с использованием масс-спектрометра МС7–100. Она является основной, поскольку предоставляет возможность производить анализ газа в термохимическом реакторе непрерывно и непосредственно во время эксперимента, в то время как первая система — контрольная.

Особенности выбранного источника тепла — ЭДП-109М — обуславливают необходимость организации теплозащиты вокруг центрального канала, через который проходит струя азотной плазмы, полученной в плазмотроне. Стенки, образующие центральный канал, являются защищаемыми.

Геометрически центральный канал был выполнен в форме прямоугольника с шириной, значительно превосходящей высоту. Такая конструкция обеспечила возможность не защищать боковые стенки, удаленные от центра потока. Два канала ТХР, в которые подается смесь метана и водяного пара, были размещены около самых теплонапряженных поверхностей. На рис. 2 изображена принципиальная схема экспериментального ТХР. На входе в ТХР был размещен смеситель с тангенциальной подачей компонентов, обеспечивающей их смешение и распределение между верхним и нижним каналами.

Корпус модельного реактора изготовлен из сплава ХН78Т, у которого температура начала окисления в воздушной среде составляет 1150 °С, а рекомендуемая максимальная

температура применения в течение длительного времени (до 10000 ч) — 1100 °С. Этот сплав используется для изготовления жаровых труб высокотемпературных камер сгорания турбореактивных двигателей, работающих при температурах 1000–1100 °С.

Другим важным достоинством сплава ХН78Т заключается в том, что состав его компонентов близок к составу нихрома марки Х20Н80, который используется в качестве материала катализатора. Это позволяет после специальной обработки внутренних поверхностей реактора осуществлять паровую конверсию углеводородов непосредственно на его стенке.

Для увеличения степени конверсии углеводородного топлива были созданы специальные каркасные катализаторы. Полученный катализатор представляет собой спрессованную нихромовую проволоку, вытравленную для повышения удельной поверхности и активированную в кислородной атмосфере в муфельной печи. Более подробное описание экспериментального реактора можно найти в [6, 7].

Экспериментальное исследование

Проведение экспериментов имело целью определить режимы работы ТХР теплозащиты с максимальной степенью конверсии при условии снятия значительных тепловых потоков. Кроме того, проверялась применимость выбранного материала корпуса ТХР и анализировалась работа новых катализаторов.

Входными параметрами эксперимента были: расходы водяного пара и метана в реакторе; расход азота в плазмотроне; температура смеси паров воды и метана на входе в реактор; мощность плазмотрона. А основные непосредственно измеряемые выходные параметры — температура охлаждаемой стенки реактора, определяемая в шести точках, и химический состав смеси, отбираемый в точках пробоотбора.

На основании измеренных величин входных и выходных параметров были получены величина теплового потока, скорость течения смеси и степень конверсии метана. Всего было проведено четыре продолжительных эксперимента, в ходе которых исследовано 11 стационарных режимов. Во всех экспериментах расход азота поддерживался на уровне 9,1 г/с, а температура смеси водяного пара и метана на входе в реактор

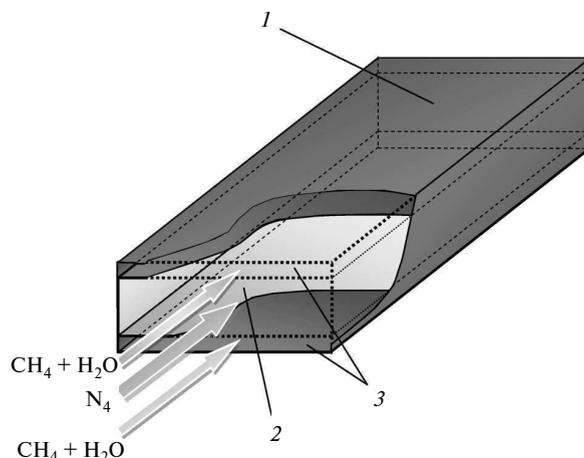


Рис. 2. Схема экспериментального ТХР:
1 — внешняя поверхность; 2 — центральный канал;
3 — каналы ТХР

была близкой к 600 К. Остальные параметры экспериментов указаны в табл. 1. В первом эксперименте в каналы ТХР не был установлен каркасный катализатор.

Математическое моделирование

Полученных экспериментальных данных недостаточно для полного описания изучаемых процессов теплообмена, поскольку не все физические величины могли быть измерены в ходе эксперимента. Для определения таких величин необходимо воспользоваться аппаратом математического моделирования. Основываясь на полученных в ходе эксперимента данных, можно составить модель, описывающую соотношение искомых величин в условиях протекавшего эксперимента.

В первую очередь необходимо определить величины удельного теплового потока, исходящего от азотной плазмы и поглощаемого в ТХР. Поглощаемый удельный тепловой поток — основной критерий применимости паровой конверсии в элементах активной тепловой защиты. Далее необходимо рассчитать степень конверсии и оценить относительную эффективность работы ТХР в реализованных режимах.

Была разработана двумерная модель, состоящая из двух частей. Первая часть модели (модель центрального канала) описывает взаимодействие струи азотной плазмы и металлической стенки ТХР, для которой известна измеренная температура; в этой части определяются величины удельного теплового потока. Вторая часть

Таблица 1

Основные параметры экспериментов

| Режим | Расход водяного пара, г/с | Расход метана, г/с | Мощность плазмотрона, кВт | Средняя температура стенки, К |
|-------|---------------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 1.1 | 0,27 | 0,13 | 25,1 | 1277 |
| 2.1 | 0,3 | 0,13 | 14,8 | 838 |
| 2.2 | 0,29 | 0,14 | 39,5 | 1255 |
| 2.3 | 1 | 0,51 | 49,8 | 1514 |
| 3.1 | 0,26 | 0,12 | 16,3 | 1011 |
| 3.2 | 0,26 | 0,13 | 29,9 | 1330 |
| 4.1 | 0,26 | 0,13 | 26,1 | 1247 |
| 4.2 | 0,44 | 0,33 | 30,1 | 1250 |
| 4.3 | 0,44 | 0,54 | 30 | 1271 |
| 4.4 | 0,45 | 0,53 | 51 | 1453 |
| 4.5 | 0,45 | 0,54 | 60,2 | 1502 |

модели (модель канала ТХР) описывает процессы, происходящие непосредственно внутри ТХР, а именно нагрев и химические преобразования потока компонентов; с ее помощью определяется скорость и состав реагирующей смеси, причем расчет производится на основании вычисленного удельного теплового потока.

Математические расчеты велись в среде конечно-разностного моделирования Comsol 4.3a. В первой части модели эксперимента использовался модуль «Conjugate Heat Transfer. Во второй части модели использовались модули: «Darcy's Flow», «Heat Transfer in Fluids» и «Transport of Concentrated Species».

Результаты исследования

Зависимость удельного теплового потока, поступающего в ТХР, от температуры охлаждаемой стенки показана на рис. 3. Важный параметр изучаемого процесса — удельное теплотеплопоглощение. Оно определяется как величина тепловой энергии, поглощенной единицей массы реагирующей смеси, и в стационарном режиме рассчитывалось по следующей формуле:

$$\omega = \frac{\int_0^l q(x) dx}{G},$$

где $q(x)$, Вт/м² — удельный тепловой поток на расстоянии x , м, от начала реактора; l , м — длина реактора; G , кг/с, массовый расход компонентов.

Для всех пройденных стационарных режимов была определена величина удельного теплопоглощения как функция теплового потока. Эта зависимость показана на рис. 4.

Как видно, в некоторых экспериментах величина удельного теплопоглощения достигала 3 МДж/кг. Однако в ряде экспериментов с высокой степенью конверсии удельное теплопоглощение было менее 2 МДж/кг. Поскольку теоретический максимум величины удельного теплопоглощения для смеси метана и воды со стехиометрическим соотношением компонент составляет примерно 10 МДж/кг, включая химический хладоресурс около 6 МДж/кг [8], то можно утверждать, что в режимах с высокой степенью конверсии непосредственно в зоне охлаждения реализуется от 17 до 63 % общего хладоресурса.

В табл. 2 сравниваются величина удельного теплопоглощения, достигнутая в эксперименте, и максимальное теоретическое теплопоглощение использовавшихся нестехиометрических смесей (их хладоресурс). Как видно по данным таблицы, степень использования хладоресурса для охлаждения стенки в разных экспериментах сильно менялась, при этом степень конверсии оставалась высокой в режимах с высокой температурой стенки.

Проведенные эксперименты позволили оценить работоспособность реактора как элемента теплозащиты в режимах с высокими степенями конверсии. Были достигнуты удельное теплопоглощение 3–3,5 МДж/кг внутри реактора и степень использования хладоресурса внутри ТХР 63 %.

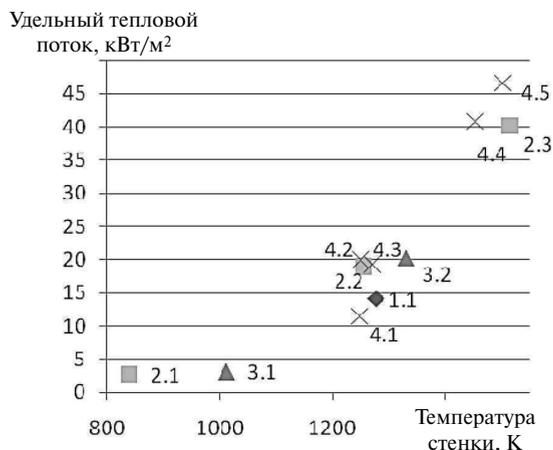


Рис. 3. Зависимость удельного теплового потока от температуры стенки
 (♦ – 1.1; ■ – 2.1, 2.2, 2.3; ▲ – 3.1., 3.2.;
 × – 4.1., 4.2, 4.3, 4.4, 4.5)

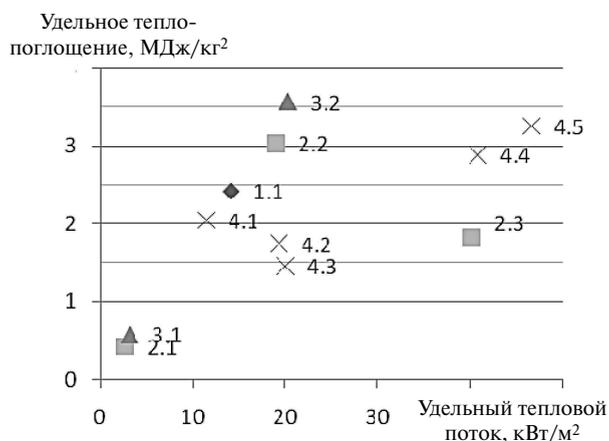


Рис. 4. Зависимость удельного теплопоглощения от удельного теплового потока
 (♦ – 1.1; ■ – 2.1, 2.2, 2.3; ▲ – 3.1., 3.2.;
 × – 4.1., 4.2, 4.3, 4.4, 4.5)

Таблица 2

Удельное теплопоглощение, степень использования хладоресурса и степень конверсии.

| Режим | Удельное теплопоглощение (эксперимент), МДж/кг | Максимальное теоретическое удельное теплопоглощение, МДж/кг | Степень использования хладоресурса внутри ТХР, % | Степень конверсии |
|-------|--|---|--|-------------------|
| 1.1 | 2,42 | 5,53 | 44 | 0,43 |
| 2.1 | 0,42 | 5,14 | 8 | 0,11 |
| 2.2 | 3,02 | 5,54 | 55 | 0,98 |
| 2.3 | 1,82 | 5,74 | 32 | 0,98 |
| 3.1 | 0,57 | 5,37 | 11 | 0,14 |
| 3.2 | 3,56 | 5,67 | 63 | 0,98 |
| 4.1 | 2,04 | 5,96 | 34 | 0,98 |
| 4.2 | 1,74 | 7,39 | 24 | 0,86 |
| 4.3 | 1,45 | 8,81 | 17 | 0,99 |
| 4.4 | 2,88 | 9,01 | 32 | 0,99 |
| 4.5 | 3,25 | 9,19 | 35 | 0,99 |

Выбранный материал проработал более 100 минут при температуре более 1000 °С. На нем не было замечено никаких механических изменений и не выявлено образование окалины.

В режимах 4.4 и 4.5 с расходом метана большим, чем расход водяного пара, удельное теплопоглощение (соответственно 2,88 и 3,25 МДж/кг) было выше, чем в режиме 2.3 (1,82 МДж/кг) с расходом водяного пара в два раза большим,

чем расход метана. При этом степени использования хладоресурса и степени конверсии в них были близки.

Созданный катализатор позволил осуществить высокие степени конверсии. Сравнивая близкие режимы 1.1 и 4.1, можно увидеть, что не только возросла степень конверсии (соответственно 0,43 и 0,98), но и снизилась температура охлаждаемой стенки (1277 и 1247 К соответственно).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бальмина Р.В., Губанов А.А., Иванькин М.А., Лапинский Д.А. Состояние и перспективы разработки гиперзвукового вооружения // *Новости зарубежной науки и техники*. Серия: Авиационная и ракетная техника. 2012. Вып. 1–2. С. 1821–1822.
2. Lander H., Nixon A. Endothermic fuels for hypersonic vehicles // *AIAA* 68–997. P. 1–12.
3. Веселов В.В., Рафал А.Н. Состав газа конверсии углеводородов. Киев: Наукова думка, 1976.
4. Kuranov A., Korabelnikov A. Hypersonic technologies of atmospheric cruise flight under AJAX concept // *AIAA*. P. 2008–2524.
5. Электродуговые плазмотроны. Рекламный проспект / Под ред. М.Ф. Жукова; Акад. наук СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики. Новосибирск: Наука, 1975. 44 с.
6. Куранов А.Л., Корабельников А.В., Михайлов А.М. Экспериментальные исследования паровой конверсии метана в термохимическом реакторе // *Международный симпозиум «Термохимические процессы в плазменной аэродинамике»*: Сб. докл. Санкт-Петербург, 2012.
7. Куранов А.Л., Корабельников А.В., Михайлов А.М. Применение паровой конверсии углеводородного топлива в энергетических установках гиперзвуковых летательных аппаратов // XVI Междунар. конф. по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2012). Казань, 2012.
8. Kuranov A.L., Korabelnikov A.V., Mikhaylov A.M. Thermal protection and hydrogen production on board of the hypersonic vehicle // 18th AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference Tours.— France. 2012

REFERENCES

1. Bal'mina R.V., Gubanov A.A., Ivan'kin M.A., Lapinskiy D.A. Sostojanie i perspektivy razrabotki giperzvukovogo vooruzhenija. *Novosti zarubezhnoj nauki i tehniki. Serija: aviacionnaja i raketnaja tehniki*. 2012. Vol. 1–2. S. 1821–1822. (rus.)
2. Lander H., Nixon A. Endothermic fuels for hypersonic vehicles. *AIAA* 68–997.— P. 1–12.
3. Veselov V.V., Rafal A.N. Sostav gaza konversii uglevodorodov. Kiev: Naukova dumka, 1976. (rus.)
4. Kuranov A., Korabelnikov A. Hypersonic technologies of atmospheric cruise flight under AJAX concept. *AIAA* P. 2008–2524.
5. Jelektrodugovye plazmotrony. Reklamnyj prospekt / Pod red. M.F. Zhukova; Akad. nauk SSSR. Sib. otdnie. In-t teplofiziki. Novosibirsk: Nauka, 1975. 44 s. (rus.)
6. Kuranov A.L., Korabelnikov A.V., Mikhaylov A.M. Experimental study of steam reforming of methane in the thermochemical reactor. *International Symposium on «Thermochemical processes in plasma aerodynamics»*. St. Petersburg. Russia. 2012. (rus.)
7. Kuranov A.L., Korabelnikov A.V., Mikhaylov A.M. Application of steam conversion of hydrocarbonic fuel in hypersonic aircraft power installations. *International Conference on the Methods of aerophysical research (ICMAR)*. Kazan. Russia. 2012. (rus.)
8. Kuranov A.L., Korabelnikov A.V., Mikhaylov A.M. Thermal protection and hydrogen production on board of the hypersonic vehicle. *18th AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*. Tours. France. 2012

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУРАНОВ Александр Леонидович — доктор технических наук профессор кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, генеральный директор и главный конструктор ОАО «Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем» ХК «Ленинец»; 196066, г. Санкт-Петербург, Московский проспект 212; e-mail: mail@hypersonics.ru

КОРАБЕЛЬНИКОВ Алексей Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, начальник НИО-1 ОАО «Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем» ХК «Ленинец»; 196066, г. Санкт-Петербург, Московский проспект 212; e-mail: mail@hypersonics.ru

МИХАЙЛОВ Андрей Михайлович — аспирант кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, старший инженер ОАО «Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем» ХК «Ленинец»; 196066, г. Санкт-Петербург, Московский проспект 212; e-mail: Mikhaylov@hypersonics.ru

AUTHORS

KURANOV Aleksandr L. — Hypersonic Systems Research Institute of Leninetz HC; 196066, Moskovsky prospekt 212, St. Petersburg, Russia; e-mail: mail@hypersonics.ru

KORABELNIKOV Aleksey V. — Hypersonic Systems Research Institute of Leninetz HC; 196066, Moskovsky prospekt 212, St. Petersburg, Russia; e-mail: mail@hypersonics.ru

MIKHAYLOV Andrey M. — Hypersonic Systems Research Institute of Leninetz HC; 196066, Moskovsky prospekt 212, St. Petersburg, Russia; e-mail: Mikhaylov@hypersonics.ru

УДК 625:655.3

А.Я. Башкарёв, Н.Н. Беспалова

ЗАВИСИМОСТЬ АДГЕЗИИ БИТУМА ОТ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ ПРИГОТОВЛЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

A.Ya. Bashkarev, N.N. Bespalova

DEPENDENCE ADHESION OF BITUMEN FROM THE TIME-TEMPERATURE MODES ON MAKING ASPHALT MIXES

В статье показана возможность повышения качества дорожных покрытий за счет управления температурно-временным режимом при приготовлении горячей асфальтовой смеси. Разработана методика исследования адгезионных свойств дорожных битумов, базирующаяся на применении термофлуктуационной теории прочности. Доказано, что, применяя технологическое термостатирование, можнократно увеличить прочность асфальтового бетона и дорожных покрытий.

БИТУМ; АСФАЛЬТОБЕТОННАЯ СМЕСЬ; АДГЕЗИЯ; ТЕМПЕРАТУРА; ВРЕМЯ.

The article shows the possibility to improve the quality of road surfaces by controlling the time-temperature modes in the preparation of hot asphalt mixes. We developed a technique of research the adhesive properties of road bitumen based on the application of the thermalfluctuation theory of strength. It is proved that by using temperature control technology, you can multiples increase durability of bituminous concrete and road surfaces.

BITUMEN; BITUMINOUS MIXTURE; ADHESION; TEMPERATURE; TIME.

Развитие дорожного строительства непрерывно ставит задачу повышения прочности и долговечности асфальтобетонных покрытий. Большинство международных фирм, специализирующихся на создании высококачественных дорог, ведут научный поиск, направленный на повышение прочности дорожных одежд и их стойкости к образованию колеи. Главным направлением в этом поиске стало применение различных полимерных добавок и поверхностно активных веществ, способствующих упрочнению связей, которые создаются главным связующим — битумом [1, 2].

Асфальтовый бетон — композиционный материал, который примерно на 95 % состоит из минеральных частиц размером от нескольких микрон до десятков миллиметров, соединенных тончайшей пленкой битума [3–5]. В нашей работе была поставлена задача изучить зависи-

мость адгезионных свойств пленки битума от температуры и продолжительности приготовления асфальтобетонной смеси, которая используется для создания дорожного покрытия [6].

Предварительно была сформулирована следующая концепция образования адгезионных связей между битумом и минеральным материалом.

Битум — довольно сложное органическое вещество, включающее в себя, как известно, масла, смолы и асфальтены. Молекулярное строение этих составляющих имеет достаточно высокую степень полимеризации, поэтому в обычных условиях они практически не образуют химических связей с другими веществами. При определенной подвижности битум с твердыми материалами образует почти стопроцентную фактическую площадь контакта, заполняя все микрошероховатости их поверхностей. Возникает довольно

прочное сцепление, которое образуется за счет действия связей физической природы, т. е. ван-дер-ваальсовых сил. Их особенность заключается в том, что они возникают при относительно большом расстоянии r между молекулами веществ ($r = 10^{-9}$ м). Однако эта энергия, т. е. прочность, на порядок, а иногда и больше, уступает энергии химических связей, которые образуются только при $r = 10^{-10}$ м. Энергия ван-дер-ваальсового притяжения — 0,4–40 кДж/моль, химических валентных сил — 40–400 кДж/моль.

С повышением температуры полимолекулы битума подвергаются термодеструкции, т. е. разрыву, в результате которого образуются химические активные радикалы, обеспечивающие появление прочных связей. Частично эти радикалы взаимодействуют между собой, образуя в битуме трехмерные молекулярные структуры, что приводит к уменьшению его деформационной способности. Часть активных радикалов создает связь с минеральными материалами, усиливая прочность их соединения между собой.

Процесс термодеструкции протекает во времени, т. е. количество разрывов полимолекул и число активных радикалов увеличиваются. Но процесс этот не приводит к монотонному увеличению прочности соединения битума с минералом и повышению прочности битумной пленки. Дело в том, что термодеструкции подвергаются и образовавшиеся адгезионные связи, имеющие свой период существования, продолжительность которого зависит от температуры.

Термодеструкция полимерных молекул битума также приводит к снижению прочности соединения, в результате чего наступает когезионное разрушение композита.

Представляемая здесь концепция развития и последующей деструкции адгезионного соединения может быть описана математически.

Согласно термофлуктуационной теории прочности и критерию Бейли долговечность материала τ (или любого соединения) при температуре T и переменных напряжениях $\sigma(t)$ в нем определяется выражением [7–9]

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u - \gamma \sigma(t)}{RT}} = 1,$$

где $\tau_0 = 10^{-11} - 10^{-13}$ с; u — энергия активации процесса разрушения; γ — структурно чувстви-

тельный коэффициент; R — газовая постоянная; t — время.

Поскольку количество образующихся за время t адгезионных связей пропорционально элементарным разрушениям молекул, то при отсутствии нагрузки и постоянной температуре количество адгезионных связей N , а значит, и прочность соединения увеличивались бы по линейному закону. На рис. 1 этот процесс представлен прямой 1 . За элементарный отрезок времени в момент $t = \varphi$ число связей будет равно

$$dN_1 = z \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_6}{RT}}.$$

Здесь u_6 — энергия активация разрушений битума; z — коэффициент, отражающий долю из числа появившихся активных радикалов, которые образовали адгезионные связи. Естественно, что z всегда меньше единицы.

Из числа связей, образовавшихся в момент $t = \varphi$, к моменту t_* происходит термодеструкция некоторого их числа N_2 :

$$dN_2 = dN_1 \int_{\varphi}^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT(t)}}.$$

здесь u_a — энергия активации процесса деструкции адгезионных связей. Тогда количество сохранившихся связей к тому же моменту t_* будет равно

$$dN_3 = dN_1 - dN_2 = \left(1 - \int_{\varphi}^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}} \right) dN_1.$$

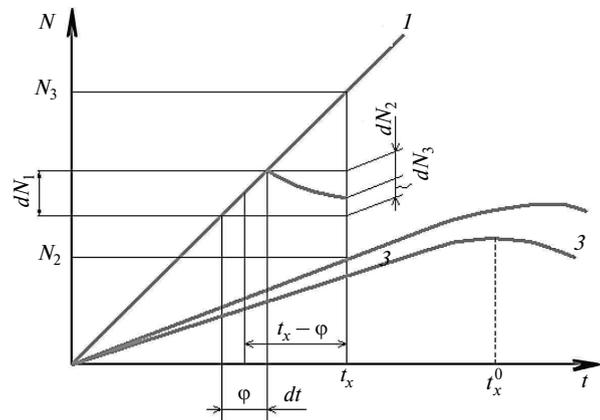


Рис. 1. Динамика изменения количества адгезионных связей

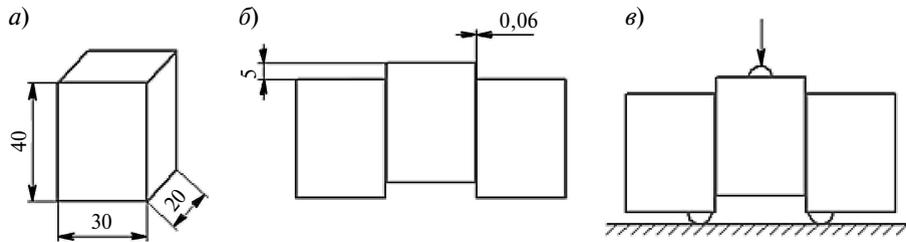


Рис. 2. Образцы для испытания адгезии битума

Общее число связей, сохранившихся с начала процесса термодеструкции, определится выражением

$$N_3 = \int_0^{t_*} \frac{\left(1 - \int_0^{t_*} \frac{dt}{\varphi \tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}} \right)}{\tau_0 \exp \frac{u_6}{RT}} d\psi.$$

Это выражение будет справедливо и при переменной температуре, т. е. когда $T = T(t)$. Но при $T = \text{const}$ оно принимает довольно простой вид:

$$N_3 = z \frac{t_*}{\tau_0 \exp \frac{u_6}{RT}} \left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}} \right).$$

Если первую производную от $N_3 = N_3(t_*)$ приравнять к нулю, то получится выражение для определения момента, когда прочность соединения будет максимальной, так как в это время оно будет обладать максимальным числом адгезионных связей:

$$t_*^0 = \tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}.$$

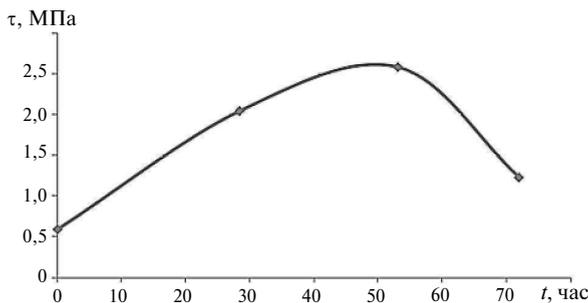


Рис. 3. Зависимость прочности от времени термостатирования при температуре 140 °С

Таким образом, если получить экспериментально график зависимости адгезионной прочности от времени термостатирования при заданной технологической температуре, то по его экстремуму можно найти величину u_a .

В нашей работе для этой цели была проведена серия опытов, для чего была изготовлена партия образцов из гранита, изображенных на рис. 2, а. После нагревания до температуры 140 °С они склеивались с помощью дорожного битума марки БНД 60/90 по схеме, представленной на рис. 2, б. Затем они сразу помещались при этой же температуре в термостат, где выдерживались различные периоды времени. После охлаждения до нормальной температуры образцы разрушались нагружением на сдвиг (рис. 2, в).

График зависимости адгезионной прочности от времени термостатирования представлен на рис. 3.

Согласно полученным результатам оптимальное время термостатирования при температуре 140 °С было около 50 часов, т. е. $18 \cdot 10^4$ с. Следовательно, энергия активации разрушения адгезионного соединения битума с гранитом, рассчитанная с помощью последней формулы, составляет 136 кДж/моль.

Как говорилось выше, только часть образовавшихся радикалов битума реализуется в создании адгезионных связей с другими составляющими асфальтобетонной смеси. Остальные, взаимодействуя между собой, создают в нем трехмерные структуры, что делает битумный слой менее подвижным. Несомненно, это должно отразиться на способности к деформированию всего асфальтового бетона, т. е. дорожного покрытия. Чем жестче битумный слой в композите, тем меньше его деформируемость и тем медленнее будет проходить образование дорожной колеи.

Проводя испытания адгезионной прочности, авторы данной работы исследовали зависимость деформации на сдвиг от величины касательных напряжений. Скорость деформирования соединений была постоянна для всех образцов — 0,01 мм/с. На рис. 4 представлен график изменения условного модуля деформации на сдвиг G_y , $\frac{H}{\text{мм}^2} \frac{1}{\text{мм}}$, образцов с теми же режимами термостатирования, которые были приведены выше.

Анализ результатов показывает, что при термостатировании изменяется не только прочность соединения «битум — гранит», но и его деформируемость (хотя и в меньшей степени). Прочность соединения увеличилась в 4 раза, а условный модуль сдвига примерно в 2 раза.

Асфальтобетонные дорожные покрытия в летнее время работают при повышенной температуре. Именно в это время происходит интенсивный процесс образования дорожной колеи. Способность композита противостоять нагрузке именно при нагреве оказывается определяющей в оценке его качеств. Нами было проведено сравнительное испытание нетермостатированных адгезионных соединений «гранит — битум» и термостатированных при тех же 140 °С в течение 25–28 часов. Испытания проводились в диапазоне температур +5–40 °С. Результаты испытания адгезионной прочности представлены на рис. 5, где кривая 1 — изменение прочности термостатированных образцов, 2 — нетермостатированных.

Они показывают, что в случае обычного асфальтового бетона уже при температуре 40 °С (а летом на солнце дорожные покрытия разогреваются до более высокой температуры) интенсивный процесс образования колеи неизбежен. Термостатирование, почти беззатратное изменение технологии, может существенно уменьшить это отрицательное явление.

Как показали исследования, битум и минеральные составляющие асфальтового бетона взаимодействуют между собой. Это взаимодействие приводит к тому, что между ними образу-

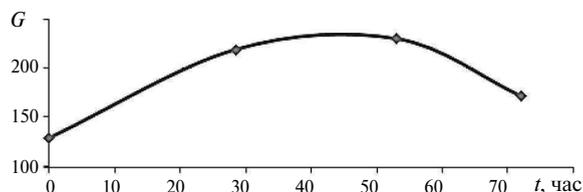


Рис. 4. График изменения условного модуля деформации на сдвиг

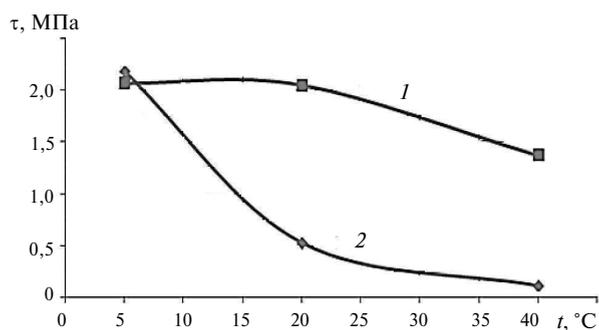


Рис. 5. Зависимость прочности адгезионного соединения от температуры испытания:

1 — термостатированные образцы;
2 — нетермостатированные образцы

ются «граничные слои». Как известно [10, 11], толщина таких слоев достигает сотен микрон. Изменение надмолекулярной структуры битума ведет к изменению механических и теплофизических свойств соединения.

Показано, что процесс образования и деструкции адгезии битума с минеральными материалами может описываться с помощью термофлуктуационной теории прочности.

Разработана и обоснована методика, с помощью которой можно определить энергию активации процесса разрушения адгезионных соединений битума.

Доказано, что прочность асфальтовых бетонов может быть значительно повышена за счет предварительного термостатирования горячих асфальтобетонных смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотарев В.А. Битумы, модифицированные полимерами и добавками. — СПб.: Славутич, 2013. С. 96–123.
2. Соломенцев А.Б. Адгезионные добавки для дорожных битумов и асфальтобетонов и оценка их эффективности // Дороги. 2013. Т. 69. С. 80–83.

3. Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы: Учебник для автомобильных дорожных институтов. М.: Транспорт, 1983. 383 с.
4. Мелик-Багдасаров М.С., Гиоев К.А., Мелик-Багдасарова Н.А. Строительство и ремонт дорожных

асфальтобетонных покрытий: Учебное пособие. Белгород, 2007. 163 с.

5. **Котлярский Э.В.** Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона: Учебное пособие. М., 2004. 194 с.

6. **Дементьев Н.В.** Влияние производственных процессов на качество полимерно-битумного вяжущего // Дорожная держава. 2013. Спец. выпуск С. 67–69.

7. **Bailey Y.** Attempt to correlate some tensile strength measurement on glass // *Glass industry*. 1939. Vol. 20, №1. P. 20–35.

8. **Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И.** Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993. 475 с.

9. **Иваньков С.А., Башкарев А.Я.** О долговечности и прочности композитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. №4. С. 169–199.

10. **Липатов Ю.С.** Коллоидная химия полимеров. Киев: Наукова Думка, 1984. 344 с.

11. **Привалко В.П., Новиков В.В., Янковский В.Г.** Основы теплофизики полимерных материалов. Киев: Наукова Думка, 1991. 232 с.

REFERENCES

1. **Zolotarev V.A.** Bitumens modified polymers and additives. — St. Petersburg: Slavutich, 2013. P. 96–123 (rus.).

2. **Solomentsev A.B.** Adhesion additives for road bitumen and asphalt, and evaluate their effectiveness. *Doroga*. 2013. Vol. 69. P. 80–83. (rus.)

3. **Grushko I.M., Korolev I.V., Borsch I.M., Mishchenko G.M.** Road construction materials: Textbook for road traffic institutions. Moscow: Transport, 1983. 383 p. (rus.).

4. **Melik-Bagdasarov M.S., Gioev K.A., Melik-Bagdasarova N.A.** Construction and repair of asphalt road surfaces: Tutorial. Belgrade, 2007. 163 p. (rus.)

5. **Kotlyarskii E.V.** Construction and technical properties of the asphalt concrete road: Tutorial. М., 2004. 194 p. (rus.)

6. **Dement'ev N.V.** Impact on the quality of production

processes, polymer-bitumen. *Dorozhnaya derzhava*. 2013. Spets. vypuski. P. 67–69. (rus.)

7. **Bailey Y.** Attempt to correlate some tensile strength measurement on glass. *Glass industry*. 1939. Vol. 20, №1. P. 20–35.

8. **Petrov V.A., Bashkarev A.Ya., Vettegren V.I.** Physical basis of prediction of durability of structural materials. St. Petersburg: Politekhnik, 1993. 475 p. (rus.)

9. **Ivankov S.A., Bashkarev A.Ya.** On the durability and strength of composites. *Scientific and technical statements STU*. St. Petersburg, 2011. №4. S. 169–199. (rus.)

10. **Lipatov Y.S.** Colloid chemistry of polymers. Kyiv: Naukova Dumka, 1984. 344 p. (rus.)

11. **Privalko V.P., Novikov V.V., Jankowski V.G.** Fundamentals of Thermal Physics of polymeric materials. Kyiv: Naukova Dumka, 1991. 232 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАШКАРЁВ Альберт Яковлевич — доктор технических наук профессор кафедры строительных и дорожных машин института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета лауреат Государственной Премии РФ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: bashkarev@spbstu.ru

БЕСПАЛОВА Наталья Николаевна — студентка Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: bespalova91@mail.ru

AUTHORS

BASHKAREV Albert Ya. — Doctor of technical sciences, professor, laureate of the State Prize of the Russian Federation; St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: bashkarev@spbstu.ru

BESPALOVA Natalia N. — student; St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: bespalova91@mail.ru



УДК 539.3

И.Л. Исупова, П.В. Трусов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ДИФфуЗИОННЫХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

I.L. Isupova, P.V. Trusov

STEEL BEHAVIOUR SIMULATION IN THE RANGE OF DIFFUSION TRANSFORMATIONS

В статье предложена математическая модель для описания поведения сталей при термомеханическом нагружении с учетом диффузионных фазовых превращений. При построении модели применяется двухуровневый подход, основанный на использовании параметров, характеризующих состояние и эволюцию мезо- и микроструктуры. Общая задача «расщепляется» на несколько подзадач (определение напряженно-деформированного состояния и фазового состава, задачи теплопроводности и диффузии), что облегчает решение. Для описания неупругого деформирования сталей при термомеханическом воздействии используется модель, основанная на несимметричной физической теории пластичности, которая дополнительно учитывает происходящие фазовые превращения. С использованием разработанной модели выполнены численные эксперименты по одноосному нагружению образца стали при высокой температуре, в процессе чего наблюдается образование ферритной фазы.

СТАЛИ; ДИФфуЗИОННЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ЭВОЛЮЦИЯ МЕЗО- И МИКРОСТРУКТУРЫ; НЕСИММЕТРИЧНЫЕ МЕРЫ; НАПРЯЖЕННОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ.

The authors present a model of steel under thermomechanical loading with diffusion phase transformations. To construct the model, a two-level approach based on the use of internal variables — the parameters characterizing the state and evolution of meso- and microstructure of the material — has been applied. Formulation of the general problem «split» into several subtasks (the problem of determining the stress-strain state and phase composition, heat conduction and diffusion problems). To describe the inelastic deformation of steels during thermomechanical loading asymmetric crystal plasticity model is used. Numerical experiments performed with developed model for simple loading at high temperature are described and their results are analyzed.

STEELS; DIFFUSION PHASE TRANSFORMATIONS; MATHEMATICAL SIMULATION; EVOLUTION OF MESO- AND MICROSTRUCTURE; NON-SYMMETRIC STRESS-STRAIN MEASURES.

В сталях могут происходить все известные фазовые превращения твердого состояния: перлитное, промежуточное (бейнитное) и мартенситное. Фазовый переход может осуществляться по двум механизмам: мартенситному (образование мартенсита, бейнита) и диффузионному (образование феррита, перлита). Важная особенность диффузионных превращений — то, что образование новой фазы может сопровождаться перераспределением легирующих элементов и углерода, которое требует диффузионного перемещения атомов на относительно большие

(по сравнению с межатомными) расстояния. В процессе термомеханического воздействия в сталях наблюдается существенная эволюция структуры. Поэтому корректное описание ее изменения дает возможность получения материалов с заданным набором свойств.

Моделирование поведения сталей с учетом диффузионных фазовых превращений

В последнее время появилось значительное количество публикаций, посвященных моделированию поведения сталей с учетом диффузи-

онных фазовых превращений. Краткий обзор моделей можно найти в работе [1]. Весьма популярны модели, основанные на методе фазового поля, главный недостаток которых в том, что они применяются для анализа областей, представляющих собой отдельное зерно или их совокупность, и потому для описания реальных процессов в трехмерной постановке требуются существенные вычислительные затраты. Для описания процессов фазовых превращений при термомеханической обработке сталей на уровне целых конструкций часто используются кинетические макромодели, в которых для определения объемных долей сосуществующих фаз используются феноменологические соотношения, полученные при большом числе существенных допущений. При описании неупругого деформирования используются достаточно простые модели, в которых отсутствует прямое включение механизмов деформирования и фазовых превращений и их носителей, присущих в реальном материале различным структурным уровням. В большинстве опубликованных многоуровневых моделей мало внимания уделяется вопросу перехода от величин нижнего масштабного уровня на верхний масштабный уровень; обычно используются самые простые гипотезы. Таким образом, проблему построения достаточно адекватной модели для описания поведения сталей с учетом диффузионных фазовых превращений нельзя назвать полностью решенной.

Мы предлагаем математическую модель для описания поведения сталей при термомеханической нагрузке с учетом диффузионных превращений, которая лишена части указанных недостатков. При построении модели в рассмотрении вводятся следующие масштабные уровни: уровень физического тела (макроуровень I), уровень представительного макрообъема (макроуровень II) и мезоуровень. Элементом мезоуровня является кристаллит (зерно, субзерно), а представительный объем макроуровня состоит из множества элементов мезоуровня. Постановка общей задачи «расщепляется» на несколько подзадач (определение напряженно-деформированного состояния и фазового состава; задача теплопроводности и диффузии), что существенно облегчает последующее решение. На макроуровне I ставится и решается краевая задача в обычном смысле (она включает в свою поста-

новку уравнение равновесия в скоростной форме, уравнение теплопроводности, необходимые краевые и начальные условия). Для задачи определения напряженно-деформированного состояния используется основанная на физической теории упруговязкопластичности прямая модель второго типа, а для температурной задачи — первого [2, 3]. Более подробно с особенностями постановки задачи определения напряженно-деформированного состояния и температурной задачи, а также связи двух масштабных уровней можно ознакомиться в [4]. Процесс диффузии на больших масштабах происходит очень медленно, поэтому на макроуровне I задача о перераспределении атомов углерода и легирующих элементов не ставится и не решается, а принимается гипотеза о заданном распределении концентрации во всем теле. При решении задачи диффузии на макроуровне II предлагается использовать прямую модель первого типа, когда моделируемая область представляет собой совокупность отдельных кристаллитов с определенной ориентацией и каждому кристаллиту ставится в соответствие совокупность конечных элементов [2, 3].

Для описания перераспределения углерода и легирующих элементов в аустените на макроуровне II ставится и решается следующая краевая задача:

$$\begin{aligned} \dot{c}_{pA} &= \nabla(\mathbf{d}_{pA} \nabla c_{pA}); \\ c_{pA}(t=0) &= c_{p0A}; \\ c_{pA} &= c_{p\Gamma A} \text{ на } \Gamma_c, \end{aligned} \quad (1)$$

где c_{pA} , c_{p0A} , $c_{p\Gamma A}$ — соответственно концентрация p -го легирующего элемента, а также ее значения в начальный момент времени и на границе Γ_c для аустенита; \mathbf{d}_{pA} — тензор диффузии p -го компонента в аустените; θ — температура.

Для определения температуры ставится и решается следующая краевая задача для той же области:

$$\begin{aligned} \kappa \dot{\theta} - \nabla(\boldsymbol{\lambda} \nabla \theta) &= \xi_A \sum_{k=1}^{n_1} \tau_A^{(k)} \dot{\gamma}_A^{(k)} + \\ &+ \xi_\Phi \sum_{k=1}^{n_2} \tau_\Phi^{(k)} \dot{\gamma}_\Phi^{(k)} + \rho_\Phi g_\Phi \dot{\xi}_\Phi; \\ \theta(t=0) &= \theta_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где κ — теплоемкость; $\boldsymbol{\lambda}$ — тензор (2-го ранга) теплопроводности; ξ_A , ξ_Φ — объемная доля

аустенита и феррита; θ_0 — значение температуры в начальный момент времени. Первое слагаемое в правой части описывает диссипацию энергии за счет пластической деформации различных фаз, а второе — за счет происходящих фазовых превращений; здесь $\tau_A^{(k)}$, $\tau_\Phi^{(k)}$ — сдвиговое напряжение, действующее в k -й системе скольжения аустенита и феррита, $\dot{\gamma}_A^{(k)}$, $\dot{\gamma}_\Phi^{(k)}$ — скорость сдвига по k -й системе скольжения аустенита и феррита; g_Φ — скрытая теплота фазового перехода из родительской фазы в ферритную; ρ_Φ — плотность феррита. При постановке задачи теплопроводности принимается, что температура и ее градиент равны сумме значений этих величин на макроуровне и некоторых флуктуаций, поэтому температурная задача сводится к задаче в терминах флуктуаций. Граничные условия выбираются так, чтобы осредненные флуктуации градиента температуры были равны нулю [4], например можно принять, что флуктуации на границе равны нулю или воспользоваться периодическими граничными условиями.

При постановке и решении задач определения напряженно-деформированного состояния и объемных долей всех сосуществующих фаз моделируемая область рассматривается как статистическая выборка отдельных кристаллитов [2, 3]. Для определения доли феррита в каждом из зерен используется следующее кинетическое соотношение, полученное в рамках термодинамики необратимых процессов [4] (считается, что в условии равновесия термодинамический потенциал многофазной системы имеет экстремальное значение, что учитывается при получении этого выражения):

$$\frac{\partial \xi_\Phi}{\partial t} = -l \left(\frac{1}{\theta} \frac{\delta f}{\delta \xi_\Phi} - \frac{1}{\theta} \frac{\delta f}{\delta \xi_A} \right), \quad (3)$$

где l — кинетический коэффициент, а свободная энергия Гиббса f определяется выражением

$$f = f_{EL} + f_{CH} + f_S.$$

Здесь f_{EL} — упругая составляющая удельной свободной энергии, представляющая собой квадратичную форму от упругой составляющей меры деформационного состояния \mathbf{q}^e ; f_{CH} — химическая составляющая; f_S — поверхностная энергия.

Химическая составляющая свободной энергии определяется как

$$f_{CH} = \xi_A f_A + \xi_\Phi f_\Phi,$$

где выражения для удельной свободной энергии аустенита и феррита f_A , f_Φ (она определяется свободной энергией в отдельной фазе, энергией за счет смешивания компонент и их химического взаимодействия) записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} f_{A,\Phi} = & \\ = & \frac{1}{v} \sum_{p=1}^{n^*} c_{pA,\Phi} \left(x_{1pA,\Phi} + x_{2pA,\Phi} \theta + x_{3pA,\Phi} \theta \ln \theta \right) + \\ & + \frac{n_{mol}}{v} R \theta \sum_{p=1}^{n^*} c_{pA,\Phi} \ln c_{pA,\Phi} + \\ & + \frac{1}{v} \sum_{p=1}^{n^*} \sum_{j=p+1}^{n^*} c_{pA,\Phi} c_{jA,\Phi} r_{pjA,\Phi}. \end{aligned}$$

Здесь $x_{1pA,\Phi}$, $x_{2pA,\Phi}$, $x_{3pA,\Phi}$ — представленные в [5] коэффициенты разложения свободной энергии в ряд по температуре; n_{mol} — количество молей всей смеси; $r_{pjA,\Phi}$ — параметр, описывающий химическое взаимодействие между p и j компонентами в соответствующих фазах.

Выражение для определения поверхностной энергии имеет вид

$$f^S = \frac{1}{v} \sum_k \chi_{A\Phi}^k s_{A\Phi}^k,$$

где $\chi_{A\Phi}^k$ — удельная энергия межфазной границы площадью $s_{A\Phi}^k$.

Доля остаточного аустенита определяется из условия равенства единице суммы долей всех фаз в материале.

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния каждого из кристаллитов применяется упруговязкопластическая физическая теория с использованием анизотропного несимметричного закона Гука. Подробно вопрос о применении несимметричных мер напряженного и деформированного состояния при построении различных моделей материалов рассматривается в статье [6].

Необратимые деформации определяются протекающими в материале пластическими деформациями и происходящими фазовыми превращениями. Пластические деформации осу-

ществляются сдвигами по системам скольжения кристаллита; для описания процессов сдвигов по системам скольжения используется вязко-пластический закон вида

$$\dot{\gamma}_{A,\Phi}^{(k)} = \dot{\gamma}_{0A,\Phi}^{(k)} H \left(\mathbf{b}_{A,\Phi}^{(k)} \mathbf{n}_{A,\Phi}^{(k)} : \boldsymbol{\sigma} - \tau_{cA,\Phi}^{(k)} \right) \times \left(\frac{\mathbf{b}_{A,\Phi}^{(k)} \mathbf{n}_{A,\Phi}^{(k)} : \boldsymbol{\sigma}}{\tau_{cA,\Phi}^{(k)}} \right)^{1/m_{A,\Phi}}, \quad (4)$$

где $m_{A,\Phi}$ — параметр чувствительности материала к скорости деформации для аустенита, феррита; $\tau_{cA,\Phi}^{(k)}$ определяет текущее значение критического сдвигового напряжения на k -й системе скольжения в аустените, феррите; $\mathbf{n}_{A,\Phi}^{(k)}$ — единичный вектор нормали к плоскости скольжения; $\mathbf{b}_{A,\Phi}^{(k)}$ — единичный вектор по направлению вектора Бюргерса, характеризующий направление скольжения; $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений Коши; $H(\cdot)$ — функция Хэвисайда.

Упрочнение по системам скольжения в аустените, феррите будет описываться следующим соотношением в скоростной форме [4, 7]:

$$\dot{\tau}_{cA,\Phi}^{(k)} = \tau_{c0A,\Phi}^{(k)} \left[\sum_{j=1}^n a_{jA,\Phi}^{(k)} \left(\frac{\dot{\gamma}_{A,\Phi}^{(j)}}{\sum_{j=1}^n \dot{\gamma}_{A,\Phi}^{(j)}} \right)^{\Psi_{A,\Phi}} \dot{\gamma}_{A,\Phi}^{(j)} - B_{A,\Phi} \dot{\theta} \left(\frac{\tau_{cA,\Phi}^{(k)}}{\bar{\tau}_{cA,\Phi}} \left(\exp \left(-\frac{Q_{A,\Phi}}{R\theta} \right) \right)^{m_{A,\Phi}} - 1 \right)^{m_{A,\Phi}} \sum_{j=1}^n \dot{\gamma}_{A,\Phi}^{(j)}, \right.$$

где $\tau_{c0A,\Phi}^{(k)}$ — начальный предел текучести в k -й системе скольжения для аустенита, феррита; $B_{A,\Phi}$, $\bar{\tau}_{cA,\Phi}$, $m_{1A,\Phi}$, $m_{2A,\Phi}$ — материальные константы для аустенита, феррита; $Q_{A,\Phi}$ — энергия активации аустенита, феррита; $a_{jA,\Phi}^{(k)}$ — модули упрочнения аустенита, феррита.

Используя скоростную форму закона Гука, получаем выражение для скорости напряжений:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\pi} : \left(\nabla \mathbf{v}^T - \boldsymbol{\omega} - \xi_A \mathbf{b}_A^{(k)} \mathbf{n}_A^{(k)} \dot{\gamma}_A^{(k)} - \xi_\Phi \mathbf{b}_\Phi^{(k)} \mathbf{n}_\Phi^{(k)} \dot{\gamma}_\Phi^{(k)} - \xi_\Phi \mathbf{f}_\Phi^* \right) + \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{\omega}, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\pi}$ — тензор упругих свойств кристаллита; \mathbf{v} — скорость перемещений; $\boldsymbol{\omega}$ — тензор спина,

определяемый согласно модели полностью стесненного поворота Тейлора; \mathbf{f}_Φ^* — градиент трансформационной деформации, описывающий превращение родительской фазы в ферритную; $\boldsymbol{\alpha}$ — тензор термического расширения.

Для осуществления связи задачи определения напряженно-деформированного состояния с температурной задачей и задачей диффузии производится геометрическая привязка статистических элементов, используемых при определении напряженно-деформированного состояния, к физическим (пространственным) элементам в температурной задаче (задаче диффузии), т. е. кристаллиты — (статистические) элементы в задаче определения напряженно-деформированного состояния — «привязываются» к реальным объектам, имеющим конкретную геометрию. Следует отметить, что все физико-механические свойства многофазного материала определяются по правилу смеси.

С помощью представленной модели был исследован процесс образования феррита в начально аустенитной стали (Fe — С 0,1 ат.% — Mn 1,43 ат.% — Al 0,03 ат.% — N 0,0056 ат.% — P 0,016 ат.% — S 0,003 ат.% — Si 0,31 ат.%) при одноосном сжатии образца при высокой (760–800 °С) температуре. В процессе моделирования рассматривается диффузия углерода и марганца в аустените; свободная энергия родительской фазы в этом случае зависит не только от температуры, но и от концентрации соответствующих компонентов. В ходе рассматриваемого процесса температура меняется в результате тепловыделения при пластической деформации аустенита и феррита за счет выделения теплоты в ходе ферритного превращения. Неупругая деформация определяется пластической деформацией аустенита и феррита, а также изменением конфигурации вследствие ферритного превращения. Трансформационная составляющая градиента относительной скорости перемещения рассчитывалась следующим образом: $\zeta_r^{tr} = 1/3 \Delta \xi_\Phi \mathbf{I}$, $\Delta = 0,01$. Данные для расчета взяты из работ [5, 8–10]. Все параметры закона упрочнения, кроме начального предела текучести, были определены в ходе процедуры идентификации.

В процессе моделирования рассматривается диффузия углерода и марганца в аустените. Для оценки количества конечных элементов, необходимых для аппроксимации отдельного кри-

сталлита, определим диффузионный путь атома углерода за время рассматриваемого процесса (500 с) в рамках теории случайных блужданий, когда диффузия рассматривается как результат случайных периодических скачков атомов из одного узла решетки в соседний:

$$x_{\text{диф}} = \eta\sqrt{\Gamma t},$$

где η — постоянная величина, равная расстоянию до ближайшего соседа; Γ — частота скачков. Частота скачков связана с коэффициентом диффузии следующим соотношением:

$$d = \gamma\eta^2\Gamma,$$

γ — параметр, зависящий от типа кристаллической решетки.

Примем, что коэффициент диффузии равен $d_A^C = 2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$, длина скачка — $\eta = 3 \text{ \AA}$, параметр γ для кубической решетки равен $1/6$. Тогда диффузионный путь атома углерода за время рассматриваемого процесса составит $x_{\text{диф}} = 7,74 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Средний размер зерна рассматриваемой стали (порядка $200 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) превышает диффузионный путь более чем в два раза. Именно поэтому зерно необходимо аппроксимировать несколькими конечными элементами. Рассматривается представительный объем, состоящий из 343 зерен. Для дискретизации рассматриваемой области используются кубические четырехугольные элементы, внутри которых градиент концентрации не постоянен. Каждое зерно аппроксимируется тремя конечными элементами. Количество элементов было выбрано на основании рекомендаций, представленных в работе [11], и условия приемлемости времени счета и затрачиваемой памяти. Показано, что результаты численных расчетов с выбранной дискретизацией по пространству и времени являются устойчивыми.

На рис. 1 и 2 приведены кривая «интенсивность напряжений — интенсивность деформации» и зависимость объемной доли образовавшегося феррита от интенсивности деформаций (экспериментальные данные взяты из работы [12]).

В статье приведено описание модели для моделирования поведения сталей при термомеханическом нагружении с учетом диффузионных превращений. Для облегчения постановки и решения связанной задачи последняя представляется совокупностью четырех подзадач: теплопроводности, диффузии, определения напряженно-деформи-

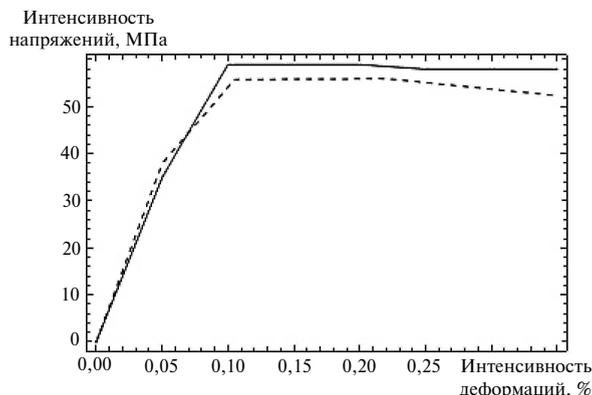


Рис. 1. Кривая «напряжение — деформации» для стали, полученная при одноосном сжатии образца со скоростью деформирования $3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}$ при температуре $760 \text{ }^\circ\text{C}$ (штриховая линия соответствует экспериментальным данным)

рованного состояния и объемных долей сосуществующих фаз. С использованием разработанной модели выполнены численные эксперименты и проанализированы результаты расчетов для случая ферритного превращения. Следует отметить приемлемое соответствие численных результатов экспериментальным данным.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект №13–01–96006–урал_а) и гранта Правительства Российской Федерации, постановление № 220 от 9 апреля 2010 г. «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования, научные учреждения государственных академий наук и государственные научные центры Российской Федерации».

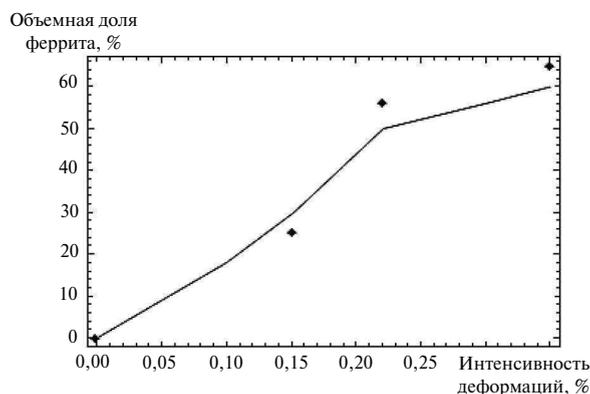


Рис. 2. Зависимость доли образующегося феррита от деформаций, полученная при одноосном сжатии образца со скоростью деформирования $3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}$ при температуре $760 \text{ }^\circ\text{C}$ (точки соответствуют экспериментальным данным)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исупова И.Л., Трусов П.В.** Обзор математических моделей для описания фазовых превращений в сталях // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. №3. С. 157–191.
2. **Трусов П.В., Швейкин А.И.** Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Статистические модели // Физическая мезомеханика. 2011. № 4. С. 17–28.
3. **Трусов П.В., Швейкин А.И.** Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Прямые модели // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14, № 4. С. 5–30.
4. **Исупова И.Л., Трусов П.В.** Математическое моделирование фазовых превращений в сталях при термомеханической нагрузке // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. №3. С. 126–156.
5. **Yadegari S., Turteltaub S., Suiker A.S.J.** Coupled thermomechanical analysis of transformation-induced plasticity in multiphase steels // *Mechanics of Materials*. 2012. Vol. 53. P. 1–14.
6. **Трусов П.В., Нечаева Е.С., Швейкин А.И.** Применение несимметричных мер напряженного и деформированного состояния при построении многоуровневых конститутивных моделей материалов // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16, №2. С. 15–10.
7. **Трусов П.В., Швейкин А.И., Нечаева Е.С., Вологов П.С.** Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15, №1. С. 33–56.
8. **Barbe F., Quey R.** A numerical modelling of 3D polycrystal-to-polycrystal diffusive phase transformations involving crystal plasticity. *Int. J. Plasticity*. 2011. Vol. 27. P. 823–840.
9. **Dinsdale A.T.** SGTE Data for Pure Elements. *Calphad*. 1991. Vol. 15. P. 317–425.
10. **Redlich O., Kister A.T.** Algebraic representation of thermodynamic properties and the classification solutions. *Ind. Eng. Chem*. 1948. Vol. 40, № 2. P. 345–348.
11. **Segal Ir.A.** Finite element methods for the incompressible Navier-Stokes equations / Institute of Applied Mathematics, Delft, Netherlands, 2012. 80 p.
12. **Lewis J.R.** Formation of deformation induced ferrite during mechanical testing: A thesis for the Degree of Master of Engineering. McGill University. Monreal, Canada. 1996. 113 p.

REFERENCES

1. **Isupova I.L., Trusov P.V.** Review of mathematical models on phase transformations in steels [Obzor matematicheskikh modeley dlya opisaniya fazovykh prevrashcheniy v stalyakh]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*. 2013. №3. P. 157–191. (rus.)
2. **Trusov P.V., Shveykin A.I.** Multilevel physical models of single- and polycrystals. Statistical models [Mnogourovnevye fizicheskie modeli mono- i polikristallov. Statisticheskie modeli]. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2011. № 4. — P. 17–28. (rus.)
3. **Trusov P.V., Shveykin A.I.** Multilevel physical models of single- and polycrystals. Direct models [Mnogourovnevye fizicheskie modeli mono- i polikristallov. Pryanmye modeli]. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2011. Vol. 14, № 4. P. 5–30. (rus.)
4. **Isupova I.L., Trusov P.V.** Mathematical modeling of phase transformations in steel under thermomechanical loading [Matematicheskoe modelirovanie fazovykh prevrashcheniy v stalyakh pri termomekhanicheskikh nagruzkakh]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*. 2013. №3. P. 126–156. (rus.)
5. **Yadegari S., Turteltaub S., Suiker A.S.J.** Coupled thermomechanical analysis of transformation-induced plasticity in multiphase steels. *Mechanics of Materials*. 2012. Vol. 53. P. 1–14.
6. **Trusov P.V., Nechaeva E.S., Shveykin A.I.** Non-symmetric stress-strain measures using when construct multilevel constitutive material models [Primenenie nesimmetrichnykh mer napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya pri postroenii mnogourovnevnykh konstitutivnykh modeley materialov]. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2013. Vol. 16, №2. P. 15–31. (rus.)
7. **Trusov P.V., Shveykin A.I., Nechaeva E.S., Volegov P.S.** Multilevel models of inelastic deformation of material and their application for description of internal structure [Mnogourovnevye modeli neuprugogo deformirovaniya materialov i ikh primenenie dlya opisaniya vnutrenney struktury]. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2012. Vol. 15, №1. P. 33–56. (rus.)
8. **Barbe F., Quey R.** A numerical modelling of 3D polycrystal-to-polycrystal diffusive phase transformations involving crystal plasticity. *Int. J. Plasticity*. 2011. Vol. 27. P. 823–840.
9. **Dinsdale A.T.** SGTE Data for Pure Elements. *Calphad*. 1991. Vol. 15. P. 317–425.
10. **Redlich O., Kister A.T.** Algebraic representation of thermodynamic properties and the classification solutions. *Ind. Eng. Chem*. 1948. Vol. 40. № 2. P. 345–348.
11. **Segal Ir.A.** Finite element methods for the incompressible Navier-Stokes equations / Institute of Applied Mathematics. Delft, Netherlands. 2012. 80 p.
12. **Lewis J.R.** Formation of deformation induced ferrite during mechanical testing: A thesis for the Degree of Master of Engineering. McGill University. Monreal, Canada. 1996. 113 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИСУПОВА Ирина Леонидовна — аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета; 614990, Комсомольский пр., 29, Пермь, Россия; e-mail: enotyforever@yandex.ru.

ТРУСОВ Петр Валентинович — доктор физико-математических наук профессор заведующий кафедрой математического моделирования систем и процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета; 614990, Комсомольский пр., 29, Пермь, Россия; e-mail: tpv@matmod.pstu.ac.ru.

AUTHORS

ISUPOVA Irina L. — Perm National Research Polytechnic University; 614990, Komsomolsky prospect 29, Perm, Russia; e-mail: enotyforever@yandex.ru.

TRUSOV Peter V. — Perm National Research Polytechnic University; 614990, Komsomolsky prospect 29, Perm, Russia; e-mail: tpv@matmod.pstu.ac.ru

УДК 536.71

В.И. Антонов, Р.В. Давыдов, Н.В. Калинин

**ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ УРАВНЕНИЯ
СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ВЕЩЕСТВО**

V.I. Antonov, R.V. Davydov, N.V. Kalinin

**ALUMINUM AND COPPER WIDE-RANGE EQUATION
OF STATE FOR MODELING EXPOSURE
TO LASER RADIATION ON MATTER**

Разработаны широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния для алюминия и меди. Получено для этих металлов хорошее согласование расчетов по разработанным уравнениям с экспериментальными данными по ударным адиабатам в области от небольших до очень высоких давлений. Предложенные уравнения состояния могут быть использованы для моделирования воздействия лазерного излучения на алюминий и медь.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ; ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; АЛЮМИНИЙ; МЕДЬ.

In this article wide-range semi-empirical equations of state for aluminum and copper were developed. Good agreement with experimental data in the range from small to very high pressures was obtained using these equations for modeling shock adiabat for both metals. The proposed equations of state can be used for modeling exposure to laser radiation on aluminum and copper.

EQUATION OF STATE; LASER RADIATION; MATHEMATICAL MODELLING; ALUMINUM; COPPER.

Результаты фундаментальных исследований в области физики высоких плотностей энергии имеют множество практических применений в различных отраслях промышленности и энергетики. Круг задач, которые решают исследователи и разработчики новых технологий, очень широк: от простой обработки металлов лазерным излучением до проблем с термоядерным синтезом. Особенно быстро развиваются направления, связанные с воздействиями мощного лазерного излучения на вещество [1]. Проведение подобных экспериментов — дорогостоящий процесс, требует как специального оборудования, так и привлечения значительного числа обслуживающего персонала, причем вероятность получения в таких экспериментальных исследованиях положительного результата невысока. Это объясняется тем, что сложен экс-

перимент, его проведение зависит от большого числа мало связанных между собой факторов и условий. Поэтому перед тем, как проводить дорогостоящие и трудоемкие экспериментальные исследования, необходимо, опираясь на теорию и моделирование процессов, оценить будущие возможные результаты, на основании чего сделать вывод о целесообразности исследований в конкретном направлении, особенно если теория и моделирование показывают отсутствие возможного положительного результата. Для успешного же моделирования такого рода процессов необходимо знать термодинамические свойства вещества в широком диапазоне температур и давлений. Таким образом, существует потребность в создании широкодиапазонных уравнений состояния веществ, что и является целью данной работы.

Подходы к разработке широкодиапазонных уравнений состояния

При воздействии на металлы интенсивных потоков энергии происходят быстрые переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое, начиная с твердого тела и заканчивая плазмой. Расчет термодинамических свойств в такой ситуации представляет довольно сложную задачу [2]. Использовать только теоретические подходы для ее решения недостаточно [3].

Для описания свойств слабонеидеальной плазмы часто используют химическую модель, основанную на уравнениях ионизационного равновесия, но учет эффектов неидеальности в рамках модели представляет собой серьезную проблему, полностью не решенную до настоящего времени [4].

В последнее время активно развиваются такие перспективные подходы, как прямое численное моделирование квантовыми методами Монте-Карло [5, 6] и молекулярной динамики [7], но их возможности пока ограничены. А квантово-статистические модели (модели Томаса — Ферми, Хартри — Фока) часто рассматривают только свойства электронной подсистемы в приближении сферической ячейки и пренебрегают оболочечной структурой электронов атома. И даже самые современные оболочечные модели, вроде модифицированной модели Хартри — Фока — Слэтера, пока далеки от совершенства.

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в разработке моделей для расчета термодинамических свойств веществ, при построении уравнений состояния чаще всего используют полуэмпирический подход, когда в выражение для термодинамического потенциала вводят константы, которые определяют путем сопоставления с расчетными и экспериментальными данными [8]. Простейшими примерами полуэмпирических уравнений являются уравнения ван-дер-ваальсовского типа для газов [9]. Для металлов, в частности алюминия и меди, также было разработано немало уравнений состояния, в том числе широкодиапазонных [10], однако они содержат очень большое число коэффициентов и чересчур громоздки для вычислений. В данной статье предлагаются достаточно простые, но весьма точные широкодиапазонные уравнения состояния для обоих металлов.

Полуэмпирическая модель уравнения состояния

Уравнение состояния можно записывать в различных формах — термической, калорической или канонической. Каноническое уравнение представляет собой выражение для одного из термодинамических потенциалов (внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия Гельмгольца или потенциала Гиббса) через независимые переменные, относительно которых записывается его полный дифференциал. Каноническое уравнение независимо от того, в каком из этих четырех видов оно представлено, содержит полную информацию о термических и калорических свойствах термодинамической системы. Для описания термодинамических свойств металлов в статье используется свободная энергия Гельмгольца F , которая представлена суммой трех слагаемых — отвечающих за тепловой вклад электронной F_e и ядерной F_a компонент, а также упругой части взаимодействия F_c :

$$F = F_e + F_a + F_c.$$

Тепловой вклад электронной компоненты в уравнение состояния вычислялся по модели Томаса — Ферми с квантовыми и обменными поправками [11]. Это квантово-статистическая модель, широко используемая для расчетов различных свойств плазмы в экстремальных состояниях [12]. Она основана на решении многоэлектронного уравнения Шредингера для атома в приближении сферической ячейки. Но допущения, принятые в этой модели, в частности использование сферической ячейки и пренебрежение корреляционными эффектами, могут привести к существенным ошибкам в области умеренных плотностей и температур при расчетах только лишь по этой модели.

Второе слагаемое в уравнении состояния рассчитывается следующим образом [13]:

$$F_a = \frac{3T}{2m_a} \ln \left(\frac{\theta^2}{T^2} + \frac{\alpha(V_0/V)^{2/3}}{T} \right),$$

где

$$\theta = \theta_0 (V_0/V)^{2/3} e^{\left(\frac{(\gamma_0 - 2/3)B^2 + D^2}{B} \arctg \frac{B \ln(V_0/V)}{B^2 + D(\ln(V_0/V)) + D} \right)}.$$

Здесь m_a — масса атома, V_0 — табличная величина удельного объема, γ_0 — значение коэффициента Грюнайзена при нормальных условиях,

а неизвестные коэффициенты B, D, α, θ_0 определялись из требования оптимального описания данных опытов по измерению теплового расширения и ударной сжимаемости пористых образцов веществ.

Зависимость энергии упругого взаимодействия задается в виде [14]

$$F_c a_0 V_{0c} \ln \left(\frac{V_{0c}}{V} \right) - 3V_{0c} \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{i} \left(\left(\frac{V_{0c}}{V} \right)^{\frac{i}{3}} - 1 \right) + 3V_{0c} \sum_{i=1}^2 \frac{b_i}{i} \left(\left(\frac{V_{0c}}{V} \right)^{\frac{i}{3}} - 1 \right),$$

где коэффициенты b_i имеют вид

$$b_1 = - \left[Z^2 \frac{3}{10} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{\frac{1}{3}} + Z^{\frac{4}{3}} \frac{11}{36} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \times a_B E_H (A m_u V_{0c})^{-\frac{4}{3}};$$

$$b_2 = Z^{\frac{5}{3}} \frac{1}{5} (3\pi^2)^{\frac{2}{3}} a_B^2 E_H (A m_u V_{0c})^{-\frac{5}{3}}.$$

Здесь V_{0c} — удельный объем при $P=0$ и $T=0$ К; E_H — энергия Хартри; a_B — радиус Бора; m_u — атомная единица массы, A — атомная масса, Z — атомный номер элемента.

Для определения коэффициентов a_i ставится задача минимизации в точках $V_n = \frac{V_{0c}}{10n}$, $n = 1, \dots, 100$ среднеквадратичного относительного отклонения давления от результатов расчетов по модели Томаса — Ферми с поправками при выполнении условий для давления, модуля объемного сжатия и его первой и второй производных при $V = V_{0c}$:

$$P_c(V_{0c}) = 0;$$

$$B_c(V_{0c}) = - \frac{V dP_c}{dV} = B_0;$$

$$\dot{B}_c(V_{0c}) = - \frac{dB_c}{dP_c} = \dot{B}_0;$$

$$\ddot{B}_c(V_{0c}) = - \frac{d \left(V \frac{dB_c}{dV} \right)_c}{dB_c} = \ddot{B}_0.$$

Задача условной минимизации решается с помощью введения множителей Лагранжа.

Параметры $B_0, \dot{B}_0, \ddot{B}_0$ подбираются итерациями так, чтобы при нормальных условиях удовлетворялись табличная величина удельного объема V_0 и значения модуля изоэнтропического сжатия и его производной по давлению, определенные по данным статических и динамических измерений.

Полученные результаты

В результате исследований были получены уравнения состояния алюминия и меди. Рассчитанные коэффициенты для обоих уравнений приведены в таблице.

Коэффициенты уравнений состояния

| Название коэффициента | Значения коэффициента для двух металлов | |
|-----------------------|---|-----------|
| | Алюминий | Медь |
| V_{0c} | 0,36 | 0,11 |
| a_0 | 6923,21 | 56,71 |
| a_1 | -4772,76 | -37952,99 |
| a_2 | 1265,23 | 9813,52 |
| a_3 | 51,24 | 0,05 |
| b_1 | -5061,08 | -39123,33 |
| b_2 | 1597,09 | 10603,31 |
| θ_0 | 0,20 | 0,27 |
| D | 0,23 | 0,52 |
| B | 0,32 | 1,80 |
| γ_0 | 1,95 | 1,90 |
| α | 0,01 | 0,01 |
| V_0 | 0,37 | 0,11 |

Были рассчитаны ударные адиабаты для обоих металлов; они сравнивались с экспериментальными данными [15–21] (рис. 1 и 2). Значками на рисунках обозначены различные экспериментальные данные, сплошной линией — расчеты по разработанному уравнению состояния.

Графики демонстрируют, что полученные результаты для обоих металлов очень хорошо совпадают с экспериментальными данными при давлениях до 10^3 ГПа. При более высоких давлениях отмечается небольшое отклонение расчетов от экспериментальных данных, обусловленное с тем, что используемая модель Томаса — Ферми для описания электронной компоненты уравнения состояния не содержит поправок, связанных с оболочечной структурой

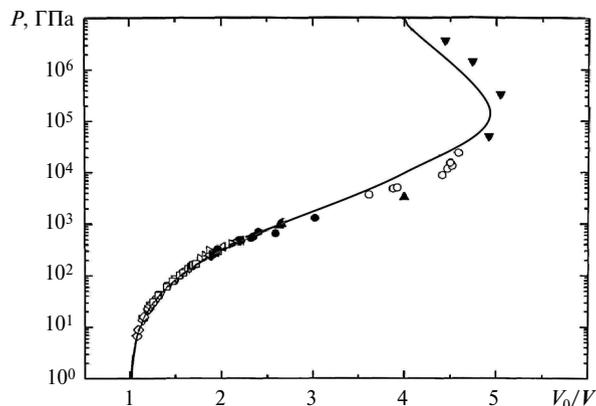


Рис. 1. Ударная адиабата алюминия в координатах «давление — степень сжатия»

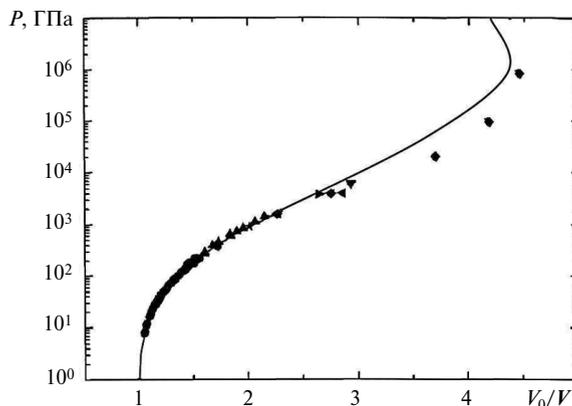


Рис. 2. Ударная адиабата меди в координатах «давление — степень сжатия»

электронов атома. Однако согласованность расчетов с экспериментальными данными остается достаточно хорошей как для алюминия, так и для меди вплоть до давлений порядка 10^6 ГПа. Отсюда можно сделать вывод, что разработанные

уравнения состояния могут быть успешно использованы для моделирования различных задач физики высоких плотностей энергии, в частности воздействия лазерного излучения на алюминий и медь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Г.Н. Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии // Успехи физических наук. 2013. №7. С. 673–718.
2. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы М.: Физматлит, 2010. 528 с.
3. Kremp D., Schlanges M., Kraeft W.D. Quantum Statistics of Nonideal Plasmas. *Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics*, 2005. Vol. 25., 525 p.
4. Хомкин А.Л., Муленко И.А., Шумихин А.С. Базовые химические модели неидеальной атомарной плазмы // Теплофизика высоких температур. 2004. № 6. С. 835–842.
5. Militzer B., Ceperley D.M. Path Integral Monte Carlo Calculation of the Deuterium Hugoniot. *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 85. № 9. P. 49–53.
6. Driver K.P., Cohen R.E., Wu Z., Militzer B., Rios P.L., Towler M.D., Needs R.J., Wilkins J.W. Quantum Monte Carlo computations of phase stability, equations of state, and elasticity of high-pressure silica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. Vol. 107, № 21. P. 9519–9524.
7. Cong W., Yao L., Ming-Feng T., Xian-Tu H., and Ping Z. Equations of state and transport properties of warm dense beryllium: A quantum molecular dynamics study. *Physical Review E*. 2013. 87, 043105.
8. Бушман, А.В. Фортов В.Е. Модели уравнения состояния вещества // Успехи физических наук. 1983. №2. С. 177–232.
9. Новиков И.И. Уравнения состояния газов и жидкостей. К столетию уравнения Ван-дер-Ваальса. М.: Наука, 1975. 264 с.
10. Гударенко Л.Ф., Куделькин В.Г. Метод построения широкодиапазонных термодинамически согласованных уравнений состояния на основе локальных уравнений с использованием модели смеси // «ВАНТ» Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2009. 1. С. 44–54.
11. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы и методы расчета росселандовых пробегов и уравнений состояния М.: Физматлит, 2000. 400 с.
12. Фортов В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // Успехи физических наук. 2007. №4. С. 347–368.
13. Агранат М.Б., Андреев Н.Е., Ашитков С.И. [и др.]. Определение транспортных и оптических свойств неидеальной плазмы твердотельной плотности при фемтосекундном лазерном воздействии // Письма в ЖЭТФ. 2007. Vol. 85. С. 328–333.
14. Хищенко К.В. Уравнение состояния магния в области высоких давлений // Письма в журнал технической физики. 2004. Vol. 19. С. 65–71.
15. Владимиров А.С., Волошин Н.П., Ногин В.Н. [и др.]. Ударная сжимаемость алюминия при $P > 1$ Гбар // Письма в ЖЭТФ. 1984. Vol. 39. С. 69–72.
16. Глушак Б.Л. Жарков А.П., Жерноклетов М.В. [и др.]. Экспериментальное изучение термодинами-

ки плотной плазмы металлов при высоких концентрациях энергии // ЖЭТФ. 1989. Vol. 96. С. 1301–1318.

17. **Marsh S.P.** LASL Shock Hugoniot Data. *Berkeley: University of California Press*. 1980. 658 p.

18. **Mitchell A.C., Nellis W.J.** Shock compression of aluminum, copper and tantalum. *J. Appl. Phys.*, 1981. Vol. 52, № 5. P. 3363–3374.

19. **Симоненко В.А., Волошин Н.П., Владимиров А.С. [и др.]**. Абсолютные измерения ударной сжима-

емости алюминия при давлениях $P > 1$ ТПа // ЖЭТФ. 1985. Vol. 88. С. 1452–1459.

20. **Трунин Р.Ф., Подурец М.А., Симаков Г.В. [и др.]**. Новые данные по сжимаемости алюминия плексигласа и кварца, полученные в условиях сильной ударной волны подземного ядерного взрыва // ЖЭТФ. 1995. Vol. 108. С. 851–861.

21. **Van Thiel M.** Compendium of shock wave data. *Livermore: Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50108*. 1977. 670 p.

REFERENCES

1. **Makarov G.N.** Primeneniye lazerov v nanotekhnologii: polucheniye nanochastits i nanostruktur metodami lazernoy ablyatsii i lazernoy nanolitografii. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2013. № 7. S. 673–718. (rus.)

2. **Fortov V.Ye., Khrapak A.G., Yakubov I.T.** Fizika neidealnoy plazmy. M.: Fizmatlit, 2010. 528 s. (rus.)

3. **Kremp D., Schlanges M., Kraeft W.D.** Quantum Statistics of Nonideal Plasmas. *Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics*. 2005. Vol. 25. 525 p.

4. **Khomkin A.L., Mulyukov I.A., Shumikhin A.S.** Bazovyye khimicheskiye modeli neidealnoy atomarnoy plazmy. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2004. № 6. S. 835–842. (rus.)

5. **Militzer B., Ceperley D.M.** Path Integral Monte Carlo Calculation of the Deuterium Hugoniot. *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 85. № 9. P. 49–53.

6. **Driver K.P., Cohen R.E., Wu Z., Militzer B., Rios P.L., Towler M.D., Needs R.J., Wilkins J.W.** Quantum Monte Carlo computations of phase stability, equations of state, and elasticity of high-pressure silica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. Vol. 107, № 21. P. 9519–9524.

7. **Cong W., Yao L., Ming-Feng T., Xian-Tu H., and Ping Z.** Equations of state and transport properties of warm dense beryllium: A quantum molecular dynamics study. *Physical Review E*. 2013. Vol. 87, 043105. (rus.)

8. **Bushman A.V., Fortov V.E.** Modeli uravneniya sostoyaniya veshchestva. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1983. №2. С. 177–232. (rus.)

9. **Novikov I.I.** Uravneniya sostoyaniya gazov i zhidkostey. K stoletiyu uravneniya Van-der-Vaalsa. M.: Nauka, 1975. 264 s. (rus.)

10. **Gudarenko L.F., Kudelkin V.G.** Metod postroyeniya shirokodiapazonnykh termodinamicheskikh soglasovannykh uravneniy sostoyaniya na osnove lokalnykh uravneniy s ispolzovaniyem modeli smesi. «VANT» Seriya: Matematicheskoye modelirovaniye fizicheskikh protsessov. 2009. №1. S. 44–54. (rus.)

11. **Nikiforov A.F., Novikov V.G., Uvarov V.B.** Kvan-

tovo-statisticheskiye modeli vysokotemperaturnoy plazmy i metody rascheta rosselandovykh probegov i uravneniy sostoyaniya. M.: Fizmatlit, 2000. 400 s. (rus.)

12. **Fortov V.Ye.** Moshchnyye udarnyye volny i ekstremalnyye sostoyaniya veshchestva. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2007. №4. S. 347–368. (rus.)

13. **Agranat M.B., Andreyev H.E., Ashitkov S.I. [и др.]**. Opredeleniye transportnykh i opticheskikh svoystv neidealnoy plazmy tverdotelnoy plotnosti pri femtosekundnom lazernom vozdeystvii. *Pisma v ZhETF*. 2007. №85. S. 328–333. (rus.)

14. **Khishchenko K.V.** Uravneniye sostoyaniya magniya v oblasti vysokikh davleniy. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2004. Vol. 19. S. 65–71. (rus.)

15. **Vladimirov A.S., Voloshin N.P., Nogin V.N. [и др.]**. Udarnaya szhimayemost alyuminiya pri $R > 1$ Gbar. *Pisma v ZhETF*. 1984. Vol. 39. S. 69–72. (rus.)

16. **Glushak B.L., Zharkov A.P., Zhernokletov M.V. [и др.]**. Eksperimentalnoye izucheniye termodinamiki plotnoy plazmy metallov pri vysokikh kontsentratsiyakh energii. *ZhETF*. 1989. Vol. 96. S. 1301–1318. (rus.)

17. **Marsh S.P.** LASL Shock Hugoniot Data. *Berkeley: University of California Press*. 1980. 658 p. (rus.)

18. **Mitchell A.C., Nellis W.J.** Shock compression of aluminum, copper and tantalum. *J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 52, № 5. P. 3363–3374. (rus.)

19. **Simonenko V.A., Voloshin N.P., Vladimirov A.S. [и др.]**. Absolyutnyye izmereniya udarnoy szhimayemosti alyuminiya pri davleniyakh $R > 1$ ТПа. *ZhETF*. 1985. Vol.88. S. 1452–1459. (rus.)

21. **Trunin R.F., Podurets M.A., Simakov G.V. [и др.]**. Novyye dannyye po szhimayemosti alyuminiya pleksiglasa i kvartsa, poluchennyye v usloviyakh silnoy udarnoy volny podzemnogo yadernogo vzryva. *ZhETF*. 1995. Vol. 108. S. 851–861. (rus.)

21. **Van Thiel M.** Compendium of shock wave data. *Livermore: Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50108*. 1977. 670 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АНТОНОВ Валерий Иванович — доктор технических наук заведующий кафедрой высшей математики профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: antonovvi@mail.ru

ДАВЫДОВ Роман Вадимович — магистрант кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: davydovroman@outlook.com

КАЛИНИН Николай Валентинович — доктор физико-математических наук профессор кафедры высшей математики профессор; Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: nvkalinin@rambler.ru

AUTHORS

ANTONOV Valeriy I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: antonovvi@mail.ru

DAVYDOV Roman V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: davydovroman@outlook.com

KALININ Nikolay V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nvkalinin@rambler.ru

УДК 621.318.3

И.А. Вечеров, А.П. Ненашев, А.А. Парфентьев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ДЕФОРМАЦИИ ОДНОСЛОЙНОГО КВАЗИБЕССИЛОВОГО МАГНИТА

I.A. Vecherov, A.P. Nenashev, A.A. Parfentiev

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL CALCULATIONS OF DEFORMATION OF THE SINGLE-LAYER QUASI-FORCE-FREE MAGNET

В статье рассмотрены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов однослойного квазибессилового магнита с обмоткой конечной толщины. Ранее расчеты были выполнены в приближении бесконечно малой толщины слоев и непрерывного токораспределения. Необходимое условие равновесия квазибессилового магнита — баланс полных сил растяжения и сжатия в радиальном направлении, возникающих вследствие действия на обмотку полоидальной и азимутальной компонент магнитного поля. У магнита с обмоткой конечной толщины наблюдается отклонение от равновесного состояния. Нарушение условия равновесия компенсируется путем введения дополнительного аксиального поля. В ходе эксперимента было показано влияние дополнительного поля на деформации магнита.

КВАЗИБЕССИЛОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА; СИЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ; ДЕФОРМАЦИИ; ИНТЕРФЕРОМЕТР; БАЛАНС СИЛ.

The article considers the results of computer simulation by the method of finite elements for a single-layer quasi-force-free magnet winding of finite thickness. Earlier calculations were made in the approximation of infinitesimal thickness of layers and continuous current distribution. A necessary condition for equilibrium quasi-force-free magnet is the balance of the full forces of expansion and contraction in the radial direction, arising out of actions on a winding represents the dependences on toroidal and azimuthal components of a magnetic field. For the magnet winding of finite thickness is marked deviation from the equilibrium state. Violation of the conditions of equilibrium is compensated by injection an additional axial field. The experiment made shows the effect of the additional fields on deformations of a magnet.

QUASI-FORCE-FREE MAGNET; STRONG MAGNETIC FIELD; DEFORMATIONS; INTERFEROMETER; BALANCE OF FORCES.

Магнитные поля применяются во многих областях науки как удобный, универсальный инструмент исследований. С помощью магнитного поля легко воздействовать на исследуемый объект, при этом не разрушая его. В мире существуют несколько крупных лабораторий, обладающих мощными установками по созданию сильных магнитных полей, которые привлекаются для научных исследований в различных областях — от изучения свойств твердого тела, изучения поведения живых организмов до работ в области термоядерного синтеза.

Сама по себе проблема создания сильного магнитного поля (от 10 до 100 Тл) — комплексная,

требующая решения трех основных задач: создания источника энергии достаточной мощности; преодоления перегрева и термического разрушения магнита; снижения либо преодоления механических напряжений, приводящих к разрушению магнита. Если первые две задачи, достаточно тесно связанные между собой, уже имеют ряд решений, то проблема механических напряжений стоит достаточно остро, поскольку применяемые материалы не способны выдержать механические напряжения, возникающие под действием пндомоторных сил, что приводит к разрушению катушки, а иногда и исследуемого образца. Одно из важнейших требований к лю-

бому эксперименту — повторяемость условий его проведения. Между тем это сложно обеспечить в случае, если катушка разрушается в ходе опыта. Из сказанного следует, что, наряду с достижением сильного поля, остро стоит вопрос о не разрушаемости самой магнитной системы. В связи с этим большой интерес представляют неразрушаемые квазибессилловые магниты. В их катушках распределение тока в обмотке организовано так, чтобы уравновесить силы, действующие на обмотку, и тем самым снизить механические напряжения, возникающие в ней.

Конструктивно такой магнит представляет собой тороидальную обмотку, уложенную на основание из диэлектрика. Угол наклона проводника и профиль образующей, по которой он укладывается, рассчитываются исходя из условия снижения механических напряжений. На внешнем радиусе обмотка удерживается экраном либо диэлектрическим бандажом.

В работах [1–4] были рассмотрены как простейшая однослойная модель, так и многослойная квазибессилловая обмотка с токами, изменяющими свое направление в каждом слое. Аналитические расчеты различных конфигураций аксиально-симметричных квазибессилловых систем, приведенные ранее [5], показали резкое снижение механических напряжений в обмотке. Расчеты были выполнены в предположении бесконечно малой толщины слоев и непрерывного токораспределения в азимутальном направлении. На практике обмотка имеет конечную толщину и дискретное токораспределение, что может приводить к появлению механических напряжений и деформациям обмотки выше расчетных

В данной работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований однослойного магнита с обмотками конечной толщины и численных расчетов, выполненных методом конечных элементов. Отмечено отклонение от равновесного состояния у магнита конечной толщины. Аналитически и численным расчетом показана возможность коррекции сил, действующих в обмотке, путем введения дополнительного аксиального поля. В ходе эксперимента было показано влияние дополнительного поля на деформации магнита, а также рассмотрена возможность дополнительной коррекции магнитной системы с целью достижения минимальных деформаций обмотки.

Квазибессилловая магнитная система. Условия равновесия обмоток

Конфигурации различных аксиально-симметричных квазибессилловых систем описаны в работе [6]. Эти системы состоят из двух областей: внутренней — рабочей; внешней — зоны токоотвода. Во внутренней области магнита находится квазибессилловая обмотка, в общем случае состоящая из N токовых слоев. Индукция магнитного поля в этой обмотке имеет полоидальную составляющую B_p и азимутальную составляющую поля B_ϕ , при этом линейная плотность тока в слоях выбирается такой, что все слои находятся в состоянии равновесия. На внешней области магнита поле нельзя считать бессилловым, так как индукция поля в этой области может иметь как азимутальную, так и полоидальную составляющую. Последняя при этом весьма мала, если азимутальный ток в этой области отсутствует. Радиальные механические усилия, возникающие здесь вследствие неравновесия обмотки, воспринимаются внешним диэлектрическим бандажом. Исходная конфигурация в приближении бесконечно малой толщины слоя и расчетная модель с обмоткой реальной толщины показаны на рис. 1 (ось Z — ось аксиальной симметрии).

Необходимое условие равновесия квазибессиллового магнита — баланс полных сил растяжения и сжатия в радиальном направлении, возникающих вследствие действия на обмотку полоидальной и азимутальной компонент магнитного поля. Равнодействующая этих сил определяет механические напряжения, возникающие в обмотке [4, 6]. Радиальная компонента полной силы равна

$$F_r = \frac{B_i^2 - B_e^2}{2\mu_0}, \quad (1)$$

где B_i , B_e — индукции с внутренней и внешней стороны токового слоя.

В уравновешенной обмотке малой толщины сила $F_r = 0$. В этом случае выполняется известное условие равновесия, когда модули индукций B_p и B_ϕ равны. Деформации системы с уравновешенной радиальной компонентой силы будут минимальны [4]. При этом можно ожидать, что система с минимальным смещением границы соответствует системе с минимальными эффективными напряжениями.

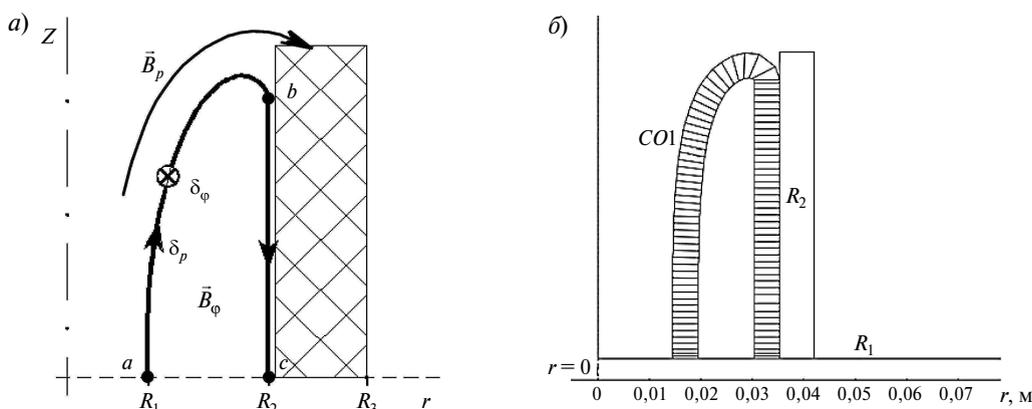


Рис. 1. Исходные конфигурации квазибесселевой обмотки:

a — обмотка в приближении бесконечно малой толщины; *b* — расчетная модель обмотки в программе COMSOL

В реальном магните условие $F_r = 0$ может быть нарушено. Причиной отличия радиальной силы от нуля могут быть дефекты конструктивного выполнения обмотки. На равновесие обмотки влияет также дискретность проводников, так как расчетное распределение плотности тока непрерывно, а не дискретно.

Силы, воздействующие на обмотку, можно изменить, включив дополнительное азимутальное поле. Оно создается аксиальным током, который проходит по оси магнита. Проводник с аксиальным током подключен параллельно магниту, поэтому дополнительное поле изменится во времени так же, как основное. Регулируя величину дополнительного поля, можно компенсировать небаланс радиальной силы, возникший вследствие технологических дефектов. Таким образом можно производить настройку магнита на минимальную деформацию, а значит, и на минимальные механические напряжения.

В формуле (1) дополнительное поле учтено следующим образом.

Азимутальная компонента индукции с внутренней стороны обмотки есть

$$B_{i\varphi} = \mu_0 i_2 / (2\pi R), \quad (2)$$

а с внешней стороны —

$$B_{e\varphi} = \mu_0 (i_1 + i_2) / [2\pi(R + d)] = B_{1\varphi} + B_{2\varphi}, \quad (3)$$

где i_1 — полоидальный ток в обмотке. Соответственно

$$B_{1\varphi} = \mu_0 i_1 / [2\pi(R + d)];$$

$$B_{2\varphi} = \mu_0 i_2 / [2\pi(R + d)].$$

Индукция полоидального поля с внутренней стороны равна своему расчетному значению

$$B_{i\rho} = B_0, \quad (4)$$

а снаружи равна нулю.

При наличии продольного тока выражение для радиальной силы принимает вид

$$2\mu_0 F_r = (B_0^2 + B_{2\varphi}^2) - B_{e\varphi}^2. \quad (5)$$

В случае обмотки малой толщины $B_{2\varphi} = B_{i\varphi}$. В этом приближении имеем следующее выражение для радиальной силы:

$$2\mu_0 F_r = B_0^2 - B_{1\varphi}^2 - 2B_{2\varphi} B_{1\varphi}. \quad (7)$$

Формула (7) показывает, что в зависимости от знака индукции дополнительного поля $B_{i\varphi}$, т. е. в зависимости от знака полоидального тока i_2 , сила F_r может изменить свой знак и принять нулевое значение. В уравновешенной обмотке малой толщины сила $F_r = 0$ без включения дополнительного поля, т. е. при условии $B_{i\varphi} = 0$. В этом случае выполняется известное условие равновесия, когда модули индукций B_0 и $B_{1\varphi}$ равны.

Компьютерное моделирование деформации обмотки квазибесселевого магнита

Для компьютерного моделирования квазибесселевой обмотки методом конечных элементов использована программа COMSOL Multiphysics. При выборе геометрии в качестве исходной принята конфигурация однослойного магнита с внешним бандажом (рис. 1). Она была рассчитана путем решения краевой задачи в приближении бесконечно малой толщины обмотки.

В ходе расчета осуществлен переход к обмотке конечной толщины. Толщины витков и бандажа выбраны такими же, как у экспериментальной магнитной системы.

Основной целью расчета была проверка возможности настройки системы на минимум смещения ее границ. В ходе моделирования в программе решались три задачи. Первые две задачи — это моделирование полей, создаваемых азимутальными и полоидальными токами в обмотке.

Данные, полученные при моделировании магнитных полей, использовались при решении механической задачи. Силы, действующие в обмотке, были заданы следующей системой уравнений:

$$F_r = B_{z p_1} J_{\varphi_1} - B_{z \varphi_2} J_{p_2}; \quad (8)$$

$$F_z = B_{r \varphi_2} J_{p_2} - B_{r p_1} J_{\varphi_1}, \quad (9)$$

где F_r — радиальная составляющая силы; F_z — осевая составляющая силы; $B_{z p_1}$, $B_{r p_1}$ — осевая и радиальная составляющие магнитной индукции полоидального поля, полученные при решении первой задачи; $B_{z \varphi_2}$, $B_{r \varphi_2}$ — осевая и радиальная составляющие магнитной индукции азимутального поля, полученные при решении

второй задачи; J_{φ_1} — линейная плотность азимутального тока, задаваемая в первой задаче; J_{p_2} — линейная плотность полоидального тока, задаваемая во второй задаче.

Используя приведенные выше уравнения, в модели были получены распределения механических напряжений по Мизесу и смоделированы перемещения обмотки под действием ponderomotorных сил. На рис. 2 показаны графики распределения радиальной составляющей силы в средней части ($Z = 0$) обмотки (см. рис. 1). Графики приведены для случая равновесия обмотки ($K = 0$) и нарушения условия равновесия дополнительным током ($K = 0,01 \text{ In}$), жирными линиями показаны границы обмотки на внутреннем и внешнем радиусе.

Для моделирования действия дополнительного аксиального тока в исходную систему уравнений, описывающую силы, была введена дополнительная составляющая. При этом величина тока на оси для настройки магнита регулировалась путем выбора коэффициента K , равного отношению добавочного тока к току, протекающему в самой обмотке. Знак дополнительной составляющей в уравнении показывает, каково направление корректирующего тока относительно основного:

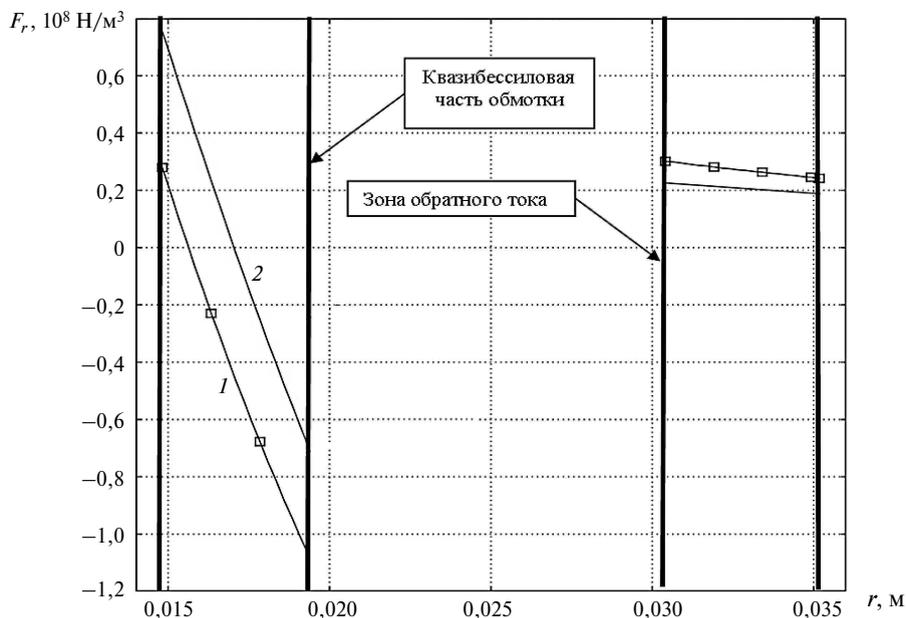


Рис. 2. Распределение радиальной составляющей силы, действующей в обмотке с дополнительным током (1) и без дополнительного тока:

—■— при $K = 0,01 I_n$; — — — при $K = 0$

$$F_r = B_{z p_1} J_{\varphi_1} - B_{z \varphi_2} J_{p_2} \pm \left(\frac{B_{z \varphi_2} (J_{p_2} K)}{r} \right) \quad (10)$$

$$F_z = B_{r \varphi_2} J_{p_2} \pm \left(\frac{B_{r \varphi_2} (J_{p_2} K)}{r} \right) - B_{r p_1} J_{\varphi_1}. \quad (11)$$

Ниже приведены графики перемещения обмотки и действующих в ней механических напряжений в зависимости от величины и направления корректирующего тока на оси магнита (рис. 3). Значение корректирующего тока на графике отложено в относительных единицах по оси абсцисс, а по двум осям ординат отложены механические напряжение σ в Па и перемещение обмотки Δr , мкм.

Из графиков видно, что нулевые перемещения обмотки соответствуют минимальным механическим напряжениям, возникающим в ней. Данные рис. 3 показывают, что при нулевом дополнительном токе напряжения в обмотке близки к минимальным и смещение границы мало. Это свидетельствует о том, что равновесие обмотки практически не было нарушено при переходе от исходной модели с обмотками нулевой толщины к реальной магнитной системе с обмоткой конечной толщины. Результаты расчета показывают, что даже небольшой дополнительный ток может заметно изменить напряжения и деформацию обмотки. Следовательно, с помощью такого тока можно производить коррекцию магнитной системы: компенсировать силы, возникающие из-за технологических дефектов обмотки, и осуществлять режим с нулевым пере-

мещением границы и минимальным напряжением.

Необходимо отметить, что численное моделирование проводилось в статическом режиме, т. е. в модели не учитывались возможные динамические эффекты.

Экспериментальные исследования деформации однослойного квазибессилового магнита с дополнительным азимутальным полем

Для исследования деформации квазибессилового обмотки разработан трехзаходный магнит. Методом быстрого прототипирования изготовлена модель и по ней отлит алюминиевый образец.

Измерения малых перемещений обмотки производились с помощью интерферометра Майкельсона, выполненного на основе He-Ne лазера с длиной волны 632 нм. На внутренней поверхности витка соленоида наклеено зеркало, а в бандеже напротив зеркала имеется отверстие для ввода лазерного луча. Комбинированная принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

Для сравнения измеренных деформаций с рассчитанными целесообразно использовать относительно слабое магнитное поле, в котором смещение поверхности проводника составляет несколько микрон, что соответствует оптимальным условиям для лазерного интерферометра, работающего в красной области спектра. Неразрушающие испытания в слабом поле позволяют,

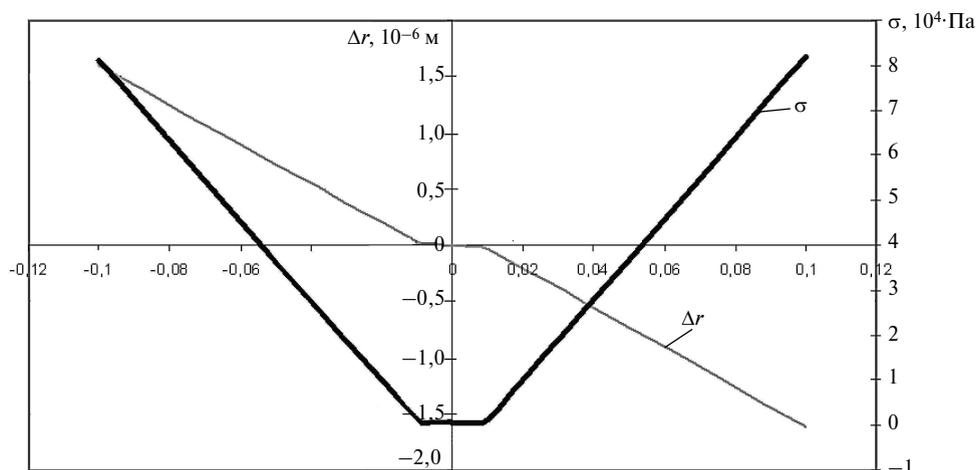


Рис. 3. Зависимость перемещения и механических напряжений в обмотке, имеющей поле с индукцией 1 Т, от корректирующего тока на оси магнита

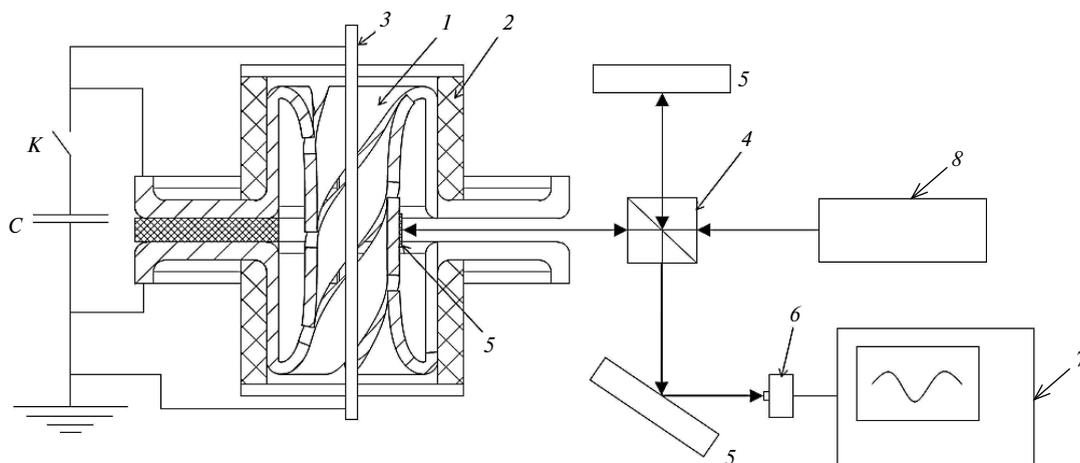


Рис. 4. Комбинированная схема экспериментальной установки:

1 — обмотка; 2 — диэлектрический бандаж; 3 — стержень с дополнительным током; 4 — делитель; 5 — зеркало; 6 — светоприемник с усилителем; 7 — осциллограф; 8 — источник лазерного излучения; C — батарея конденсаторов; K — разрядник

в частности, зафиксировать деформации, обусловленные несовершенством магнитной системы, например ее отклонением от расчетной аксиально-симметричной конфигурации.

Смещение внешней границы квазибеспиловой обмотки может быть рассчитано по изменению фазы сигнала, записанного датчиком интенсивности оптического излучения. Изменение фазы сигнала на угол 2π соответствует абсолютному значению смещения границы обмотки на расстояние, равное длине волны излучения гелий-неонового лазера (632 нм). Знак смещения не может быть определен используемым методом. На рис. 5 показана интерферограмма, а на рис. 6 — смещение внутренней границы витка.

Из этих рисунков видно, что максимум смещения, достигаемый в момент максимума тока, составляет около 0,2 мкм. Как видно из интерферограмм, максимальные перемещения за максимумом тока обусловлены вибрацией обмотки.

После проверки равновесия системы на оси катушки был установлен проводник для создания дополнительного азимутального поля и изменения режима нагружения магнита. На рис. 7 представлены результаты экспериментов при двух значениях продольного тока — $I_z = 0,14I_0$ (он здесь совпадает по знаку с током в обмотке) и $I_z = -0,14I_0$ (в этом случае он направлен навстречу току обмотки), а так же в отсутствие дополнительного тока на оси магнита ($I_z = 0$).

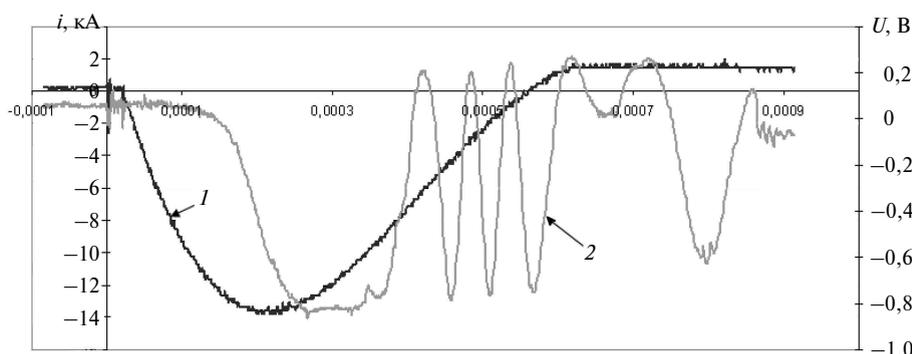


Рис. 5. Интерферограмма, характеризующая смещение обмотки соленоида:

1 — ток соленоида; 2 — изменение фазы сигнала, фиксируемое датчиком

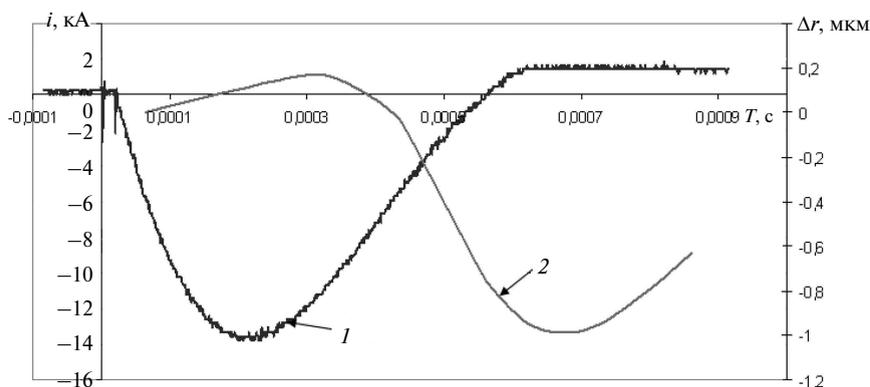


Рис. 6. Смещение обмотки соленоида (результаты обработки интерферограммы):
 1 — ток в обмотке; 2 — абсолютное значение смещения

При включении дополнительного тока согласно току в обмотке возрастает сила сжатия, действующая на обмотку. Поэтому следует ожидать, что модуль смещения будет возрастать по сравнению со смещением в исходном состоянии, если в этом состоянии смещение было отрицательным, и убывать в противоположном случае. Результаты опытов с дополнительным током показывают, что абсолютное значение смещения возрастает при согласном включении тока I_z . Отсюда следует, что начальное смещение обмотки при разряде без дополнительного тока было отрицательным. При включении дополнительного тока встречно току обмотки сжатие обмотки азимутальным полем ослабевает. Это дает основание считать, что смещение границы будет происходить в положительном направле-

нии (наружу). В эксперименте с током $I_z = +0,14I_0$ смещение по абсолютному значению близко к исходному. При этом (на основании сказанного) можно считать, что его знак изменился и стал положительным. Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили возможность «управлять» знаком деформации с помощью относительно небольшого продольного тока и при необходимости корректировать силы, возникающие в обмотке.

Расчет методом конечных элементов показал некоторое отклонение квазибессилового магнита от условия равновесия при переходе от бесконечно тонкого слоя к обмотке реальной толщины: отмечено нарушение равновесия в обмотке. Расчетом показано, что нарушение

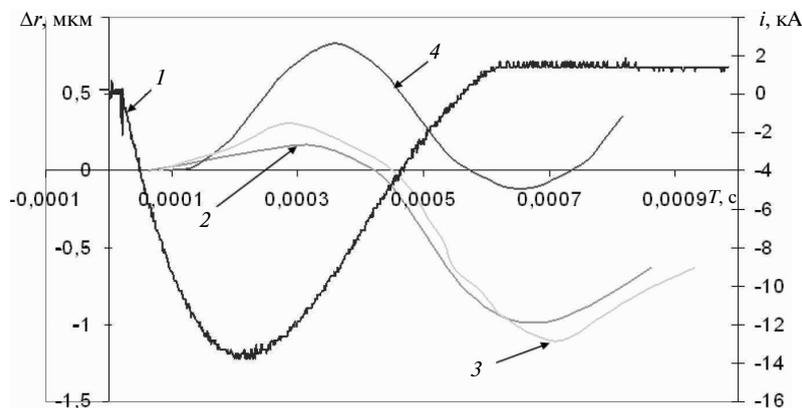


Рис. 7. Зависимость смещения обмотки соленоида от режима нагружения (I — ток магнита; перемещение при дополнительных токах: 2 — $I_z = 0$; 3 — $I_z = -0,14I_0$; 4 — $I_z = 0,14I_0$)



баланса может быть скорректировано дополнительным искусственно введенным азимутальным полем.

В ходе эксперимента на реальном образце наблюдалось смещение обмотки, что говорит о нарушении условия равновесия вследствие технологических причин. На опытном образце

была подтверждена возможность коррекции магнитного поля катушки с помощью дополнительного азимутального поля. В дальнейшем эта методика может быть применена для получения сильных и сверхсильных полей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13–08–00899

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнеерсон, Г.А. Длинные соленоиды с бессиловой обмоткой без внешних разгружающих проводников // Журнал технической физики. 1986 Т. 56, №1. С. 36–43.
2. Amromin E.L., Khosikov V.Yu., Shneerson G.A. Solenoid for Megagauss Magnetic Fields: non-collapsing Windings design Problems // *Plasma Devices and Operations*. 1998. Vol. 4. P. 321–326.
3. Shneerson G.A., Koltunov O.S. [et al.]. The Concept of Quasi-force-free Magnets: Theoretical Substantiation, Estimation of Parameters, and Feasibility // *Physica B*, 2004. Vol. 346–347. P. 566–570.

4. Колтунов О.С., Хозиков В.Ю., Шнеерсон Г.А. Минимизация остаточных напряжений в магнитных системах с квазибессильным распределением тока // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, №1. С. 110–116.
5. Shneerson G.A., Koltunov O.S. [et al.]. Models of magnets with quasi-force-free Winding Manufactured from the thin solid sheets or transposed conductors. *IEEE transactions of plasma science*. 2010. Vol. 38. № 8. P. 1731–1737.
6. Шнеерсон Г.А., Вечеров И.А., Дегтев Д.А. [и др.]. Конфигурации коаксиально-симметричных квазибессильных магнитных систем II // ЖТФ. 2008. Т.78, №10. С. 29–39.

REFERENCES

1. Shneerson G.A. Long solenoids with force-free winding without external unloading guides. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1986. Vol 56, №1. P. 36–43. (rus.)
2. Amromin E.L., Khosikov V.Yu., Shneerson G.A. Solenoid for Megagauss Magnetic Fields: non-collapsing Windings design Problems. *Plasma Devices and Operations*. 1998. Vol. 4. P. 321–326.
3. Shneerson G.A., Koltunov O.S. [et al.]. The Concept of Quasi-force-free Magnets: Theoretical Substantiation, Estimation of Parameters, and Feasibility. *Physica B*. 2004. Vol. 346–347. P. 566–570.

4. Koltunov O.S., Shneerson G.A., Khozikov V.Yu. Minimization of residual stresses in magnetic systems with quasi-force-free current distribution. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2002. Vol. 72, №1. P. 110–116. (rus.)
5. Shneerson G.A., Koltunov O.S. [et al.]. Models of magnets with quasi-force-free Winding Manufactured from the thin solid sheets or transposed conductors. *IEEE transactions of plasma science*. 2010. Vol. 38. № 8. P. 1731–1737.
6. Shneerson G.A., Vechev I.A., Degtev D.A. [et al.]. Configuration coaxial-symmetric quasi-force-free magnetic systems II. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2008. Vol. 78, №10. P. 29–39. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НЕНАШЕВ Алексей Павлович — кандидат технических наук доцент кафедры техники высоких напряжений, изоляционной и кабельной техники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Телефон: 8(812)555-42-86

ПАРФЕНТЬЕВ Анатолий Алексеевич — старший научный сотрудник кафедры техники высоких напряжений, изоляционной и кабельной техники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, СПбГПУ; 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 Россия; e-mail: an.parf@gmail.com

ВЕЧЕРОВ Иван Альбертович — аспирант кафедры техники высоких напряжений, изоляционной и кабельной техники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, СПбГПУ, Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 Россия; e-mail: preacher@yandex.ru

AUTHORS

NENASHEV Aleksey P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia

PARFENTIEV Anatoliy A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia. E-mail: an.parf@gmail.com

VECHEROV Ivan A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia. E-mail: preacher@yandex.ru

УДК 371.315

В.И. Гуменюк., А.М. Кармишин., В.А. Киреев

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ АВАРИЙ ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

V.I. Gumenyuk., A.M. Karmishin, V.A. Kireev

THEORETICAL METHODS OF ESTIMATION OF EMERGENCY DANGER ON EXPLOSIBLE OBJECTS

Рассматриваются вопросы, связанные с теоретическими методами оценивания наиболее полных и интегральных пространственных показателей опасности аварий взрывоопасных объектов. Анализируются взрывы конденсированных взрывчатых веществ и газо-, паро-, пылевоздушных смесей. С позиций квалиметрии рассматриваются поля избыточного давления во фронте воздушной ударной волны, факторные законы поражения и на этой основе — координатные законы поражения и приведенные зоны поражения.

ВЗРЫВООПАСНЫЙ ОБЪЕКТ; ПОЛЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВО ФРОНТЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ; ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ОБЪЕКТ; ФАКТОРНЫЙ ЗАКОН ПОРАЖЕНИЯ; КООРДИНАТНЫЙ ЗАКОН ПОРАЖЕНИЯ; ПРИВЕДЕННАЯ ЗОНА ПОРАЖЕНИЯ; ПАРАМЕТРЫ ЗАКОНОВ.

The article observes the issues related to theoretical methods of estimation of the most complete and integral special indicators of emergency danger on explosible objects. The explosions of condensed explosive materials as well as gas-, vapour- and dust-air mixtures are considered. From the position of qualimetry the fields of excess pressure in the shock wave front and factor damage laws are studied, and on their basis — coordinate damage laws and equivalent damage areas.

EXPLOSIBLE OBJECT; FIELD OF EXCESS PRESSURE IN THE SHOCK WAVE FRONT; ELEMENTARY OBJECT; FACTOR DAMAGE LAW; COORDINATE DAMAGE LAW; EQUIVALENT DAMAGE AREA; PARAMETERS OF DAMAGE LAWS.

Одна из актуальных научных задач в области промышленной безопасности — обоснование системы показателей, характеризующих опасность техногенных аварий, и выработка на этой основе научно обоснованных технических и следующих из этого организационных мероприятий, которые позволяют снизить опасность техногенных аварий промышленных предприятий.

В этой связи необходимо различать потенциальную опасность техногенной аварии и ее последствия [1, 2]. Потенциальная опасность техногенной аварии промышленного объекта определяется внутренними процессами ее раз-

вития, внешними процессами формирования полей поражающих факторов, а также реализацией поражающего действия на население (персонал объекта) и объекты инфраструктуры. Последствия аварии, помимо потенциальной опасности техногенной аварии промышленного объекта, зависят еще от количества и плотности распределения объектов поражения (люди, техника, инженерные сооружения) в пределах общей площади поражающего действия аварии.

В нашей стране при описании последствий техногенных аварий (катастроф), а также последствий штатного функционирования про-

мышленных объектов широко используется терминология, пришедшая из банковской сферы США, основанная на концепции риска. При этом выделяют различные уровни риска: индивидуальный, коллективный, социальный и т. д.

Описание последствий техногенных аварий в терминах риска, на наш взгляд, не совсем корректно, так как под риском обычно понимают вероятность (усредненная по времени, по пространству, по времени и пространству) наступления нежелательных последствий аварии, например летальных поражений населения. Поэтому постоянно необходимо уточнять, о каком риске идет речь.

Активно развивается одна из составляющих аксиологии (науки оценивания) — **квалиметрия** — наука о методологии всеобщего управления качеством (TQM).

Методы квалиметрии могут быть применены не только к техническим устройствам и изделиям [1, 3], но также и к техногенным авариям промышленных объектов. С использованием идеи квалиметрии в интересах решения проблемы квантификации, к настоящему времени обоснованы наиболее полные пространственно-временные показатели опасности техногенных аварий [1–4]. В интересах решения проблемы скаляризации обоснованы интегральные пространственно-временные показатели опасности. Для решения проблемы детерминизации обоснованы условные и безусловные наиболее полные статические и динамические пространственно-временные и интегральные показатели опасности техногенных аварий (катастроф) как при изолированном, так и при и комбинированном действии поражающих факторов, возникающих при техногенных авариях [2, 5].

Разработанная система показателей опасности техногенных аварий и методы их теоретической оценки сформировались в единую теорию опасности техногенных аварий на детерминированной и стохастической основах. она излагается авторами на протяжении последних 15 лет в различных вузах (Военная академия химической защиты — до 2006 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана с 2001 года по настоящее время, Военная академия связи и Санкт-Петербургский политехнический университет).

Рассмотрим методы теоретической оценки показателей наиболее полных и интегральных

показателей опасности с использованием детерминированной теории на примере взрывоопасных объектов, или, другими словами, техногенной аварии, продуцирующей мгновенно действующий поражающий фактор.

Основным поражающим фактором взрывоопасных объектов является воздушная ударная волна, при этом поле поражающего фактора (избыточное давление во фронте воздушной ударной волны) зависит от того, что взрывается: конденсированные ВВ или газо-, паро-, пылевоздушные смеси.

Как известно, избыточное давление во фронте воздушной ударной волны при взрыве конденсированных взрывчатых веществ описывается уравнением М.А. Садовского, которое не очень удобно для дальнейших аналитических исследований. С достаточной для практики точностью уравнение М.А. Садовского можно аппроксимировать следующим степенным соотношением [6]:

$$\Delta P_{\phi}(R) = A m_{\tau}^{\frac{\alpha}{3}} R^{-\alpha}, \quad (1)$$

где A и α — параметры модели, численное значение которых зависит от размерности переменных, входящих в уравнение (1) — тротилового эквивалента взрыва m_{τ} , расстояния до взрыва R и избыточного давления во фронте воздушной ударной волны ΔP_{ϕ}).

При взрыве газо-паро, пылевоздушной смеси поле избыточного давления во фронте воздушной ударной волны аппроксимируется в логарифмических координатах параболическим уравнением вида

$$\ln \Delta P_{\phi}(R) = a + b \ln \bar{R} + c \ln^2 \bar{R}, \quad (2)$$

где a , b , c — параметры модели.

Однако поле избыточного давления во фронте воздушной ударной волны в данном случае может быть описано с использованием кругового нормального закона в виде

$$\Delta P_{\phi}(x, y) = \frac{S_{\Delta P_{\phi}}}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}} = \Delta P_{\phi\max} e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где σ_x , σ_y , σ — параметры модели, имеющие размерность длины; $S_{\Delta P_{\phi}}$ — интегральная бароплощадь (параметр модели).

Для описания вероятности поражения не ниже заданной степени тяжести (применительно к людям), вероятности разрушения не ниже заданной степени тяжести (здания, строения, сооружения), вероятности повреждения не ниже заданной степени тяжести (техника и технологическое оборудование) применяются различные детерминированные и вероятностные модели. В совокупности персонал промышленного объекта, население, объекты инфраструктуры, техники и технологического оборудования в дальнейшем для краткости будем называть элементарными объектами, т. е. объектами, которые могут рассматриваться только в одном из двух состояний — поражен или не поражен.

Так, длительное время факторный закон поражения элементарного объекта при действии на него воздушной ударной волны описывался нормальным законом

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\Delta P_{\Phi} - \overline{\Delta P_{\Phi}}}{\sqrt{2} \sigma_{\Delta P_{\Phi}}} \right) \right], \quad (4)$$

однако в [5] было показано, что более корректно использование логарифмически нормального закона в виде

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{k} \ln \frac{\Delta P_{\Phi}}{\Delta P_{\Phi,50}} \right) \right], \quad (5)$$

где $\overline{\Delta P_{\Phi}}$, $\sigma_{\Delta P_{\Phi}}$, $\Delta P_{\Phi,50}$ и \sqrt{k} — параметры закона, зависящие от вида элементарного объекта поражения и рассматриваемой степени тяжести поражения.

Объединяя уравнение (1) или (2) с факторным законом поражения, можно получить наиболее полный показатель опасности взрывоопасности — координатный закон поражения (КЗП). Задача аналитического описания КЗП оказалась настолько сложной, что длительное время в этом вопросе использовались различные аппроксимации, параметры которых находились из тех или иных соображений [7]. Так, более 50 лет назад американским физиком Вигнером было предложено аппроксимировать неизвестный координатный закон поражения нецентральным χ -квадрат распределением с числом степеней свободы, равным двум:

$$G(R) = \int_0^{R_{\Pi}} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{R^2+r^2}{2\sigma^2}} I_0 \left(\frac{Rr}{\sigma^2} \right) dr, \quad (6)$$

где R_{Π} — параметр закона: радиус приведенной зоны поражения, м²; σ — параметр закона, м;

$I_0(u)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Принципиальный недостаток такого представления КЗП заключался в том, что его параметры R_{Π} и σ рассчитывались численным способом с использованием метода моментов по формуле

$$m_{\alpha} = \int_0^{\infty} R^{\alpha} G(R) dR,$$

что не позволяло проводить дальнейший аналитический анализ опасности взрывов при решении практически важных задач. Так, например, первый ($\alpha = 1$) и третий ($\alpha = 3$) моменты равны [7] соответственно

$$m_1 = \frac{R_{\Pi}^2}{2}; \quad m_3 = \frac{R_{\Pi}^2}{2} \left(2\sigma^2 + \frac{R_{\Pi}^2}{2} \right),$$

откуда, рассчитывая численными методами первый и третий начальные моменты, представлялось возможным найти параметры КЗП в виде (6).

Однако на базе уравнений (1), (2) и (5) несложно получить следующее аналитическое представление КЗП:

для взрывов конденсированных взрывчатых веществ КЗП имеет вид [5]

$$G(R) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\sqrt{k_R} \ln \frac{R}{R_{50}} \right) \right], \quad (7)$$

где R_{50} и $\sqrt{k_R}$ — параметры КЗП, выражаемые через мощность взрыва, параметры поля избыточного давления во фронте воздушной ударной волны и параметры факторного закона поражения);

для взрывов газо-, паро- и пылевоздушных смесей КЗП имеет вид [6]

$$G(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\sqrt{k} \left(\frac{x^2 - x_{50}^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2 - y_{50}^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] \right\}, \quad (8)$$

или при $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$

$$G(R) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\sqrt{k_R} \left(R^2 - R_{50}^2 \right) \right] \right\}, \quad (9)$$

где x_{50} и y_{50} — полуоси эллипса, на границе которого $\Delta P_{\Phi} = \Delta P_{\Phi,50}$; R_{50} — расстояние на котором $\Delta P_{\Phi} = \Delta P_{\Phi,50}$.

Тогда интегральный показатель опасности — приведенная зона поражения S_0 — может быть найдена следующим образом [2, 3, 5]:

$$S_0 = 2\pi \int_0^{\infty} G(R) R dR. \quad (10)$$

Так, для взрывов конденсированных взрывчатых веществ (КЗП в виде уравнения (7)) приведенная зона поражения находится следующим образом:

$$S_0 = 2\pi \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\sqrt{k_R} \ln \frac{R}{R_{50}} \right) \right] R dR = A^2 m_T^{\frac{2}{3}} \Delta P_{\phi,50}^{\frac{2}{3}} e^{\frac{1}{k_R}}, \quad (11)$$

а для взрывов газо-, паро- и пылевоздушных смесей приведенную зону поражения можно найти как

$$S_0 = \pi \sigma_x \sigma_y \ln \bar{\Delta P}_{\phi \max} \left\{ \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{k} \ln \bar{\Delta P}_{\phi \max} \right) \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\sqrt{\pi k} \ln \bar{\Delta P}_{\phi \max}} e^{-k \ln^2 \bar{\Delta P}_{\phi \max}} \right\}, \quad (12)$$

где $\bar{\Delta P}_{\phi \max}$ — максимальный бароэффект

$$\bar{\Delta P}_{\phi \max} = \frac{\Delta P_{\phi \max}}{\Delta P_{\phi 50}}.$$

Уравнения (11) и (12) позволяют количественно решать прикладные вопросы, имеющие важное практическое значение [2, 3, 5–10]:

определять последствия взрыва вплоть до структуры пораженных людей (персонал и население), а также различных объектов инфраструктуры;

анализировать влияние защитных мероприятий на снижение приведенной зоны поражения за счет повышения устойчивости элементарного объекта, т. е. увеличения $\Delta P_{\phi 50}$ или уменьшения мощности взрыва m_T ;

оптимизировать защитные мероприятия по критерию максимального снижения приведенной зоны поражения при выделенном финансовом ресурсе на их выполнение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармишин А.М., Киреев В.А., Гуменюк В.И. Проблемные вопросы промышленной безопасности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета 2013. № 2(178). С. 320–324.
2. Басенко В.Г., Гуменюк В.И., Танчук М.И. Безопасность жизнедеятельности. Защита в чрезвычайных ситуациях. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.
3. Ефимов В.Ф., Кармишин А.М., Киреев В.А. Карнюшкин А.И. Актуальные проблемы оценки пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий. Сб.: Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. VIII научно-практическая конференция. 8–10 октября 2008 г. Доклады и выступления. С-Пб.: Изд-во УГПС МЧС России, 2009. С. 199–210.
4. Кармишин А.М., Киреев В.А., Гуменюк В.И. К вопросу о количественных показателях опасности техногенных аварий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета 2(177) 2013. - ISSN 1994–2354. СПб.: ГПУ, 2013, с. 281–288.
5. Кармишин А.М., Киреев В.А. Карнюшкин А.И. Теоретическое описание комбинированного действия АХОВ // Сб. докл. на V научно-практ. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». 15–16 ноября 2005 г.— М.: ООО «Рекламно-издательская фирма «МТП-инвест», 2006. С. 379–392.
6. Кармишин А.М., Киреев В.А., Карнюшкин А.И. Оценка показателей опасности при авариях взрывоопасных объектов // Сб. матер. X научно-практ. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Оценка рисков возникновения чрезвычайных ситуаций». 5–6 октября 2010 г. М.: Изд-во Центра «Антистихия», 2010. С. 207–213.
7. Кармишин А.М., Киреев В.А. [и др.]. Теория поражающего действия ОМП. М.: Изд-во ВУ РХБ защиты, 2003. — 280 с.
8. Кармишин А.М., Киреев В.А. Карнюшкин А.И. Структура пораженных при техногенных авариях // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. IX научно-практическая конференция. 14–15 мая 2009 г. Доклады и выступления. М.: Изд-во Центра «Антистихия», 2009. С. 37–38.
9. Одинцов Л.Г. [и др.]. Технология ведения аварийно-спасательных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций / МЧС России. М.: Изд-во ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. — 286 с.
10. Актуальные вопросы предупреждения чрезвычайных ситуаций / Под общей ред. В.А. Акимова / МЧС России. М.: Изд-во ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010. 352 с.

REFERENCES

1. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Gumenyuk V.I.** Problemniye voprosy promyshlennoy bezo-pasnosti. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. № 2(178). SPb.: Izd-vo SPb. GPU, 2013. S. 320–324. (rus.)
2. **Basenko V.G., Gumenyuk V.I., Tanchuk M.I.** Bezopasnost' zhiznediel'nosti. Zashchita v chrezvychainykh situatsiyakh. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2008. (rus.)
3. **Efimov V.F., Karmishin A.M., Kireev V.A. Karnyushkin A.I.** Aktual'nye problemy otsenki prostranstvennovremennykh pokazateley opasnosti tekhnogennykh avari. *Sb.: Problemy prognozirovaniia chrezvychainykh situatsiy. VIII nauchno-prakticheskaya konferentsiya. 8–10 oktyabrya 2008 g. Doklady i vystupleniya*. Izd-vo S Pb.: UGPS MChS Rossii, 2009. S. 199–210. (rus.)
4. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Gumenyuk V.I.** K voprosu o kolichestvennykh pokazatelyakh opasnosti tekhnogennykh avari. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. №2(177). SPb.: Izd-vo SPb. GPU, 2013. S. 281–288. (rus.)
5. **Karmishin A.M., Kireev V.A. Karnyushkin A.I.** Teoreticheskoe opisaniye kombinirovannogo deistviya AKhOV». *Sb. dokl. na V nauchno-prakticheskoy konferentsii 15–16 noyabrya 2005 g. «Problemy prognozirovaniya chrezvychainykh situatsiy*. M.: OOO «Reklamno-izdatel'skaia firma «MTP-invest», 2006. S. 379–392. (rus.)
6. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Karnyushkin A.I.** Otsenka pokazateley opasnosti pri avariakh vzryvoopasnykh ob»ektov. *Sbornik materialov X nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy prognozirovaniya chrezvychainykh situatsiy. Otsenka riskov vznikoveniya chrezvychainykh situatsii». 5–6 oktyabrya 2010 g. Doklady i vystupleniya*. M.: Tsentr «Antistikhia», 2010. S. 207–213 s. (rus.)
7. **Karmishin A.M., Kireev V.A. [i dr.]**. Teoriya porazhaiushchego deistviya OMP. M.: Izd-vo VU RKhB zashchity, 2003. 280 s. (rus.)
8. **Karmishin A.M., Kireev V.A. Karnyushkin A.I.** Struktura porazhennykh pri tekhnogennykh avariakh. *Sb.: Problemy prognozirovaniya chrezvychainykh situatsiy. IX nauchno-prakticheskaya konferentsiya. 14–15 maia 2009 g. Doklady i vystupleniya*. M.: Izd-vo Tsentr «Antistikhia», 2009. S. 37–38. (rus.)
9. **Odintsov L.G. [i dr.]**. Tekhnologiya vedeniya avariyno-spatatel'nykh rabot pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy / MChS Rossii. M.: Izd-vo FGU VNII GOChS (FTs), 2011. 286 s. (rus.)
10. Aktual'nye voprosy preduprezhdeniya chrezvychainykh situatsiy / Pod obshchey redaktsiyei V.A. Akimova / MChS Rossii. M.: Izd-vo FGU VNII GOChS (FTs), 2010. 352 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУМЕНИЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

КАРМИШИН Александр Михайлович — доктор технических наук профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, г. Москва, Россия; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

КИРЕЕВ Владимир Анатольевич — доктор технических наук профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, г. Москва, Россия; e-mail: kireev@mail.ru

AUTHORS

GUMENYUK Vasily I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

KARMISHIN Alexander M. — Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2-nd Bauman Str. 5, Moscow, Russia; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

KIREEV Vladimir A. — Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2-nd Bauman Str. 5, Moscow, Russia; e-mail: kireev@mail.ru



УДК 519.2

М.С. Никулин, М.В. Сильников, К.А. Дубаренко

**О РАЗВИТИИ И ВНЕДРЕНИИ
МЕТОДОВ СТАТИСТИКИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ
ДЛЯ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА
ПРОДУКЦИИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

M.S. Nikulin, M.V. Silnikov, K.A. Dubarenko

**ON THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION
METHODS OF STATISTICS OF ACCELERATED TESTS
FOR SAFETY ANALYSIS, RELIABILITY AND QUALITY
OF PRODUCTS OF HIGH TECHNOLOGIES**

Рассмотрено новое направление обработки результатов наблюдений, а также и другие направления развития математической статистики, где достигнуты интересные для инженера результаты. Выполнен анализ методов статистики ускоренных испытаний для анализа безопасности, надежности и качества продукции высоких технологий. Рассмотрены модели долговечности (модели Лемана, Кокса, AFT, Седякина), адаптированные к изменениям в условиях проведения эксперимента, способные учитывать влияния всех важных факторов — усталости, износа, старения, деградации и т. п.

СТАТИСТИКА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ; АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ; НАДЕЖНОСТЬ; МОДЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ; УСТАЛОСТЬ; ИЗНОС; СТАРЕНИЕ; ДЕГРАДАЦИЯ.

The article describes a new direction of observation results processing as well as other directions of the development of mathematical statistics with the results interesting to an engineer.

The comparison of methods of accelerated tests statistics for safety analysis is performed alongside with durability and quality analysis of high technology products.

The timeproof models are represented (Lehmann, Cox, AFT, Sedyakin models) in adoption to different experiment conditions, the models capable to take into consideration the influence of all the important factors — tiredness, weariness, aging, degradation.

ACCELERATED TESTS STATISTICS; SAFETY ANALYSIS; DURABILITY; TIMEPROOF MODELS; TIREDNESS; WEARINESS; AGING; DEGRADATION.

Сегодня, в эпоху бурного развития новых технологий, промышленность выпускает высококачественные, надежные, сложные и дорогостоящие изделия, системы. При этом ужесточаются требования по формированию технической документации на продукцию, в которой необходимо отмечать основные характеристики надежности и качества и формулировать гарантийные обязательства предприятия-изготовителя продукции с учетом старения, деградации и условий эксплуатации изделий. Для решения такой задачи проводят специальным образом организованные *ускоренные испытания* в динамически

меняющейся среде, которые часто позволяют существенно сократить время испытаний.

Инженеры, статистики и специалисты по теории надежности должны оптимальным образом спланировать такого рода испытания, а затем пересчитать их результаты на нормальные условия, в которых и предполагается осуществлять эксплуатацию изделий.

При этом необходимо учитывать, что для обеспечения конкурентной способности оборудования производство непрерывно обновляется, а вместе с этим изменяются *стандарты по контролю качества*. Задача специалистов по

надежности и математической статистике состоит в разработке и адаптации планов ускоренных испытаний.

Методы статистики ускоренных испытаний позволяют принимать решение о надежности систем при их эксплуатации в *стандартных условиях* по результатам экспериментов, проведенных в условиях *повышенных нагрузок* (так называемые, ускоренные испытания) за более короткое время, что позволяет получить требуемые результаты за существенно более короткий срок, который удовлетворяет заказчика.

В первую очередь методы статистики ускоренных испытаний стали применять для проверки качества и надежности изделий высоких технологий, когда наблюдается мало отказов, что естественно при анализе долговечности и качества высоконадежных технических систем, например объектов ядерной энергетики, космических технологий и т. п., эксплуатируемых при этом нередко в различных, меняющихся во времени условиях.

Методы статистики ускоренных испытаний допускают к рассмотрению *цензурированные данные*, которые экспериментатор получает в результате исчезновения некоторых объектов по разным причинам. Более того, если изделия очень надежные и поэтому наблюдается очень мало отказов, то в таких случаях предлагается использовать так называемые *деградационные модели*, которые позволяют учитывать дополнительную информацию в терминах некоторых наблюдаемых процессов старения, износа, усталости и деградации с учетом влияния внешних факторов, в том числе и человеческого (стрессы, коварианты), на скорости протекания деградационных процессов.

Заметим, что здесь речь идет об изучении, исследовании и внедрении в практику новых, так называемых динамических регрессионных, моделей для анализа неоднородных статистических данных.

Модели Лемана на множестве постоянных стрессов

Предположим, что системы очень надежны и вероятность наблюдения отказов за отведенное время t при проведении испытаний крайне мала. В этом случае проводят испытания, частично или полностью, при нагрузках, превышающих

обычные эксплуатационные. Такие испытания называются *ускоренными испытаниями*. Проведение ускоренных испытаний в условиях воздействия повышенных нагрузок укорачивает длительность жизни систем, и отказы могут произойти в течение заданного времени t . Цель применения методологии ускоренных испытаний состоит в том, чтобы на основании информации, полученной за заданное время t при воздействии повышенных нагрузок, оценить время жизни объекта при нормальных условиях или при других интересующих исследователя воздействиях целого комплекса факторов. Суть ускоренных испытаний состоит в том, что за счет подбора комплекса факторов, в условиях воздействия которых функционирует объект, добиваются эффекта «сжатия» «времени жизни» объекта, при этом удается получить информацию, необходимую для статистических выводов о надежности систем. Очевидно, что для обработки такой информации надо иметь *модели долговечности*, адаптированные к изменениям в условиях проведения эксперимента, способные учитывать влияние всех важных факторов (таких, как *усталость, износ, старение, деградация* и т. п.) на долговечность испытываемых систем. Такие модели долговечности выражаются в терминах ковариант, возможно, зависящих от времени, и их называют *моделями ускорения жизни*.

Стрессы

Комплекс воздействующих факторов будем представлять в виде вектор-функции $\mathbf{x}(\cdot) = (x_1(\cdot), \dots, x_m(\cdot))^T : [0, \infty) \rightarrow \mathbf{R}^m$, компоненты которой могут быть функциями, зависящими от времени.

В теории ускоренных испытаний \mathbf{x} называется *вектором поясняющих переменных, вектором ковариант, нагрузкой* или просто *стрессом*.

Заметим, что стрессы могут быть как постоянными, так и зависящими от времени — монотонно-возрастающими или убывающими, выпуклыми, вогнутыми, периодическими, ступенчатыми и т. д., что позволяет экспериментатору проводить (в некотором смысле планировать или управлять) сложные эксперименты и при этом контролировать влияние различных физических или химических процессов и т. д. на долговечность систем.

Стресс $\mathbf{x}(s)$, где $0 \leq s \leq t$, описывает условия эксплуатации системы за период $[0, t]$. С другой

стороны стресс $x(s)$, $0 \leq s \leq t$ можно интерпретировать разным образом: как *историю* эволюции системы, как *управление*, как *план* проведения эксперимента и т. д. Компоненты стресса x могут соответствовать различным характеристикам, оказывающим влияние на работоспособность объекта, — внутренним характеристикам объекта, внешним воздействующим факторам, эксплуатационным нагрузкам, различного типа воздействиям, например мероприятиям, связанным с техническим обслуживанием и ремонтом систем, а также с проведением контрольных проверок исправности функционирования. Покажем на двух простых примерах возможности построения содержательных моделей с ковариантами, которые позволяют учитывать зависимость долговечности от условий проведения эксперимента. Для начала рассмотрим случай постоянных нагрузок, который легко распространяется на случай нагрузок, зависящих от времени.

Обозначим как E множество всех *допустимых* (возможных) стрессов. И пусть E_1 — множество стрессов, постоянных во времени, $E_1 \subset E$. Пусть T_{x_0} — наработка объекта в *нормальных* (обычных, идеальных) условиях эксплуатации, которые соответствуют нормальному стрессу x_0 ; пусть $P_0(t) = P_{x_0}(t)$ — ее функция надежности при нормальном стрессе x_0 . Далее, пусть x — произвольная постоянная во времени нагрузка из множества $E_1 \subset E$.

Модели

Необходимо ответить на вопрос: какова функция надежности $P_x(t)$ наработки до отказа T_x при нагрузке x , отличной от нормальной нагрузки x_0 ($x \in E_1 \subset E$)? Ясно, что изменение коварианта приводит к изменению законов распределения наработки до отказа. Это означает: если хотим уметь изучать долговечность системы при разных экспериментальных условиях, мы должны уметь строить семейство функций надежности $\{P_x(t), x \in E_1 \subset E\}$.

Изложим два простых примера из теории ускоренных испытаний, которые показывают, как можно строить такие модели (семейства) на множестве E_1 допустимых стрессов, постоянных во времени, $E_1 \subset E$.

В теории ускоренных испытаний широкое применение находят следующие две простые

модели $\{P_x(t), x \in E_1 \subset E\}$ на множестве E_1 . Эти две модели, которые мы будем называть *моделями Лемана* на $E_1 \subset E$, демонстрируют интересные возможности построения моделей. Предположим сначала, что существует некоторая положительная функция

$$r: E \rightarrow R^1_+,$$

которая показывает, например, суммарный эффект влияния коварианты (нагрузка, стресс) на долговечность (продолжительность безотказной работы) системы. Эта функция называется *функцией связи* (link function).

Согласно первой модели Лемана на E_1 для любой нагрузки $x \in E_1$ функция вероятности безотказной работы задается формулой

$$P_x(t) = P_0^{r(x)}(t), \quad x \in E_1 \subset E, \quad t > 0,$$

где $P_x(t)$ — функция надежности (вероятность безотказной работы) при стрессе x ; $P_0(t)$ — функция надежности при нормальном стрессе x_0 , которую часто называют *базовой* функцией надежности.

Заметим, что функция $r(\cdot) > 0$ и в общем случае она является неизвестной. Естественно считать, что в условиях нормальной эксплуатации $r(x_0) = 1$. Из определения первой модели следует, что все стрессы x ($x \in E_1 \subset E$), при которых $r(x) > 1$, соответствуют воздействию стрессов, характерных для ускоренных испытаний, причем

$$P_x(t) < P_{x_0}(t); \quad t > 0.$$

В этом случае говорят, что *стресс x является ускоренным* по отношению к x_0 и, как легко заметить, график функции $P_x(t)$ лежит ниже графика функции $P_{x_0}(t)$. Соответственно, при $0 < r(x) < 1$ имеем случай функционирования объекта в условиях пониженных нагрузок или щадящих испытаний, при этом

$$P_x(t) > P_{x_0}(t), \quad t > 0.$$

Из последней формулы следует, что график функции $P_{x_0}(t)$ лежит ниже графика функции $P_x(t)$. Здесь нормальный стресс x_0 ускорен по отношению к стрессу x .

Для этой модели на E_1 можно легко получить выражение, связывающее интенсивности отказов объектов, функционирующих в нормальных условиях и в любых других допустимых условиях, отличных от нормальных:

$$\lambda_x(t) = r(x)\lambda_0(t), \quad x \in E_1 \subset E, \quad t > 0, \quad (1)$$

где $\lambda_x(t)$ — интенсивность отказов объектов, функционирующих при стрессе x ; $\lambda_0(t)$ — интенсивность отказов объектов, функционирующих в нормальных условиях x_0 . Данная функция называется *базовой функцией интенсивности отказов*. Модель (1) — *непараметрическая*, так как функции r и $\lambda_0(t)$ в общем случае неизвестны.

Модель Кокса

В рассматриваемой модели функцию связи можно параметризовать, например в виде линейной регрессионной зависимости

$$r(x) = e^{\beta^T x},$$

откуда получим *семи-параметрическую* регрессионную модель

$$\lambda_x(t) = e^{\beta^T x} \lambda_0(t),$$

где $x \in E_1 \subset E, t > 0$.

Данная модель хорошо известна как *модель пропорциональных интенсивностей*, которая впервые была введена и изучена Коксом (1972).

Вторая модель Лемана на $x \in E_1 \subset E$ вводится иным способом, а именно: для любой нагрузки из E_1

$$P_x(t) = P_0(r(x)t), \quad x \in E_1 \subset E, \quad t > 0,$$

где, как и прежде, $r(\cdot) > 0$ — некоторая положительная функция,

$$r: E \rightarrow R_+^1,$$

которая показывает *суммарный эффект* влияния коварианты (нагрузка, стресс) на долговечность (продолжительность безотказной работы) системы. Согласно второй модели Лемана на $x \in E_1 \subset E$ плотность распределения наработки до отказа и интенсивность отказов можно представить соответственно в виде

$$\begin{aligned} f_x(t) &= r(x)f_0[r(x)t], \quad t > 0; \\ \lambda_x(t) &= r(x)\lambda_0[r(x)t], \quad t > 0. \end{aligned} \quad (2).$$

Модель AFT

Модель для интенсивности отказов в виде (2) называется AFT (*accelerated failure time*) моделью на E_1 (см., например, Meeker and Escobar (1998), Bagdonavicius and Nikulin (2002), Couallier et al., (2014)). Она более гибкая, чем модель про-

порциональных интенсивностей, так как функция связи осуществляет как преобразование времени, так и масштабирование функции интенсивности.

В общем случае в моделях (1), (2) функция базовой интенсивности отказов $\lambda_0(t)$ и функция связи r могут быть неизвестны; тогда мы имеем *непараметрическую* модель. Если функцию связи параметризовать, как это сделано в модели Кокса, а функцию базовой интенсивности отказов $\lambda_0(t)$ по-прежнему считать неизвестной, то получим *семи-параметрическую модель*. И, наконец, если параметризовать и функцию связи, и функцию базовой интенсивности отказов, то будем иметь *параметрическую модель*. Например, как и выше, мы можем предположить, что $r(x) = e^{\beta^T x}$, и в то же время допустить, что базовая функция надежности $P_0(t)$ принадлежит, например, двухпараметрическому семейству Вейбулла.

Отметим, что модель пропорциональных интенсивностей хорошо работает в случае, когда воздействующие нагрузки имеют сравнительно небольшие отклонения по сравнению с нормальными режимами эксплуатации. Ввиду этого данная модель нашла широкое применение в медицинских исследованиях (см., например, Nikulin, Commenges and Huber (2006), Bagdonavicius et al. (2011)). В технике же возможно применение экспериментов при условиях, существенно отличающихся от стандартных (нормальных), и поэтому модель Кокса не получила в индустриальной статистике такого широкого распространения, как модель AFT. В планировании и обработке результатов экспериментов в технике и инженерном деле более популярна AFT модель, которая допускает широкий диапазон изменения ковариант. Наконец, заметим, что в российской научной литературе эта модель известна скорее как *модель аддитивного накопления поврежденной*, благодаря работе Багдонавичюса (1978). Мы рекомендуем читателю познакомиться с интересными и весьма поучительными примерами применения модели AFT на E_1 , приведенными в книгах Meeker and Escobar (1998), Nikulin et al. (2010). Обширная библиография по этим вопросам приведена в списке литературы к нашей статье. Особенно мы рекомендуем посмотреть эту литературу, чтобы познакомиться с разными применениями ступенчатых стрессов и их ролью в организации оптимальных планов экс-

периментов при ускоренных испытаниях, а также новыми классами моделей (например с *моделью Седякина*), хорошо адаптируемых для обработки данных ускоренных испытаний.

Пример. Принцип Седякина

Физический принцип в теории надежности утверждает, что для двух партий однотипных систем, функционирующих при стрессах $x_1 \neq x_2$, моменты t_1 и t_1^* эквивалентны, если вероятности безотказной работы до этих моментов равны, т. е.

$$P(T_{x_1} > t_1) = P_{x_1}(t_1) = P_{x_2}(t_1^*) = P(T_{x_2} > t_1^*)$$

$$\text{для } x_1, x_2 \in E_1.$$

Этот принцип, предложенный Н. Седякиным (1966), дает интересный подход к продолжению произвольного класса функций надежности $\{P_x(\cdot), x \in E_1\}$, заданных на множестве постоянных стрессов E_1 , до класса функций надежности, заданных на ступенчатых стрессах, например на E_2 :

$$x(t) = x_1 1_{\{0 \leq t < t_1\}} + x_2 1_{\{t_1 \leq t\}}, \quad t > 0, \quad \forall x_1, x_2 \in E_1.$$

При таком *двухступенчатом стрессе* функция надежности до времени t_1 совпадает с функцией надежности P_{x_1} , но остается открытым вопрос, какой вид имеет эта функция после момента переключения t_1 , т. е. как скачок в нагрузке от значения x_1 к значению x_2 сказался на надежности системы. Один из возможных ответов на этот вопрос дает принцип Седякина.

Модель Седякина. Согласно Седякину, в некоторых ситуациях разумно рассмотреть следующую модель на E_2 :

$$\lambda_{x(\cdot)}(t_1 + s) = \lambda_{x_2}(t_1^* + s), \quad \forall s \geq 0, x(\cdot) \in E_2. \quad (3)$$

Значение этого *правила сдвига* по времени для ступенчатых стрессов из E_2 легко понять в терминах функций надежности $P_{x(\cdot)}(t)$, $x(\cdot) \in E_2$, которые тоже удовлетворяют правилу сдвига во времени:

$$P_{x(\cdot)}(t) = \begin{cases} P_{x_1}(t), & 0 \leq t < t_1; \\ P_{x_2}(t - t_1 + t_1^*), & t \geq t_1. \end{cases} \quad (4)$$

То есть согласно принципу Седякина имеем следующий результат: при переключении нагрузки в точке t_1 от значения x_1 к значению x_2 изменение функции вероятности безотказной

работы $P_{x(\cdot)}(t)$, $x(\cdot) \in E_2$ в точке t_1 происходит непрерывным образом, переходя с функции надежности $P_{x_1}(t)$ на функцию надежности $P_{x_2}(t)$ по правилу (4), где моменты t_1 и t_1^* эквивалентны в смысле принципа Седякина: в точке t_1 выполняется условие $P_{x_1}(t_1) = P_{x_2}(t_1^*)$.

Следуя результатам работ Седякина (1966) и Багдонавичюса (1978) модель, определяемая формулой (3) (или (4)), называется *моделью Седякина на E_2* . Согласно *общей модели Седякина* (GS) предполагается, что функция интенсивности отказов в любой момент времени t зависит от значения стресса в этот момент и от функции надежности до этого момента:

$$\lambda_{x(\cdot)}(t) = g(x(t), P_{x(\cdot)}(t)), \quad x(\cdot) \in E.$$

Заметим, что среди рассмотренных здесь моделей только модель АФТ удовлетворяет этому правилу. Легко показать, что для общей модели Седякина имеют место соотношения (3) и (4) (см. Bagdonavicius and Nikulin (2002)).

Наконец, отметим, что в работе Bagdonavicius and Nikulin (1997) построен критерий согласия для проверки модели Седякина, которая с успехом используется для статистического анализа надежности сложных систем с разным типом *резервирования*: как *холодным* и *горячим*, так и *теплым*.

Сегодня во всех развитых странах активно применяется статистика ускоренных испытаний.

Исследования американских, китайских, французских и японских статистиков показывают очень интересные перспективы применения теории ускоренных испытаний в индустриальной статистике, например при изучении отказов высоконадежных изделий и систем, в частности таких, как атомные электростанции, двигатели самолетов и поездов и т. д., а также при применении статистических методов в анализе данных гарантийного ремонта автомобилей или при изучении долговечности шин, при контроле качества современными методами и т. д.

Статистика ускоренных испытаний представляет собой новое направление исследований в математической статистике, которое появилось в конце прошлого века и бурно развивается сегодня во всех направлениях производственной и научно-исследовательской деятельности инженеров, врачей, ученых, экономистов, и т. д.,

в связи с естественным желанием сократить время создания новых технологий, повысить их надежность, сделать их более эффективными и при этом добиться этого наиболее экономным образом.

Первые серьезные результаты появились в монографиях V. Viertle (1988), W. Nelson (1990), W. Meeker, L. Escobar (1998), V. Bagdonavicius, M. Nikulin (1995, 1998, 2002), T. Martinussen, T. Scheike (2006), M. Nikulin, L. Gerville-Réache, V. Couallier (2007), V. Bagdonavicius,

J. Kruopis, M. Nikulin (2011), А. Антонов, М. Никулин (2012).

Редакция и авторы надеются, что инженеру будет интересно познакомиться с рассмотренным здесь новым направлением обработки результатов наблюдений, а также и другими направлениями развития математической статистики, где достигнуты новые и интересные результаты, например в теории моделей деградации, в теории применения критериев типа хи-квадрат и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cox D. Regression models and life tables. *J.R. Statist. Soc.*, 1972. В 34, P. 187–220.

2. Meeker W., Escobar L. Statistical methods for reliability data. J. Wiley. NY, Hoboken, 1998. 630 p.

3. Couallier V., Gerville-Reache L., Limnios N., Hiber C., Mesbah M. Statistical Models and Methods for Reliability and Survival Analysis. *ISTE*. 2014.

4. Sedyakin N.M. On one physical principle in reliability theory. *Thechnical Cybernetics*. 1966. Vol. 3, P. 80–87.

5. Васильев Ю.С., Дубаренко К.А., Ермилов В.В. Высшее образование — фактор устойчивого развития России // Научно-технические ведомости СПбГПУ: Наука и образование. 2012. № 3(154). Т. 1. С. 40–59.

6. Bagdonavicius V., Nikulina V. A goodness-of-fit test for Sedyakin's model. *Revue Roumaine de Mathematiques Pures et Appliquees*. 1997. Vol. 42, №1. P. 5–14.

7. Bagdonavicius V., Nikulin M. Accelerated Life Models : Modeling and Statistical Analysis. Chapman&Hall, 2002.

8. Bagdonavicius V., Kruopis J., Nikulin M.S. Non-parametric tests for censored data. *J. Wiley-ISTE*. 2011.

9. Nikulin M., Commenges D., Huber C. Probability, Statistics and Modelling in Public Health. New-York: Springer, 2006. 479 p.

10. Nikulin M.S., Limnios N., Balakrishnan N., Kahle W., Huber, C. Advances in Degradation Modeling. Applications to Reliability, Survival Analysis, and Finance. New York: Birkhauser, 2010.

11. Антонов А.В., Никулин М.С. Статистические модели в теории надежности: Учеб. пособие М.: Абрис (Высш. шк.), 2012. 390 с.:ил.

12. Antonov V., Huber C., Nikulin M., Polischook V. (eds.) Longevity, Aging and Degradation Models in Reliability, Public Health, Medicine and Biology. St. Petersburg: St. Petersburg State Polytechnic University. 2004. Vol. 1. 368 p.

13. Васильев Ю.С., Дубаренко К.А., Ермилов В.В. Управление устойчивым инновационным развитием России : проблемы опережающей подготовки кадров в системе непрерывного образования // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах : материалы XVIII Международной научно-методической конференции 17–18 февраля 2011 г. : пленарные доклады / Международная академия наук высшей школы. Санкт-Петербургское отделение; Санкт-Петербургского государственного политехнического университета [и др.]. СПб., 2011. С. 54–68.

REFERENCES

1. Cox D. Regression models and life tables. *J.R. Statist. Soc.*, 1972. В 34, P. 187–220.

2. Meeker W., Escobar L. Statistical methods for reliability data. *J. Wiley*. NY, Hoboken, 1998. 630 p.

3. Couallier V., Gerville-Reache L., Limnios N., Hiber C., Mesbah M. Statistical Models and Methods for Reliability and Survival Analysis. *ISTE*, 2014. (rus.)

4. Sedyakin N.M. On one physical principle in reliability theory. *Thechnical Cybernetics*. 1966. Vol. 3. P. 80–87.

5. Vasilyev Yu.S., Dubarenko K.A., Yermilov V.V. Vyssheye obrazovaniye — faktor ustoychivogo razvitiya Rossii. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU: Nauka i obrazovaniye*. 2012. № 3(154). Vol. 1. S. 40–59.

6. Bagdonavicius V., Nikulina V. A goodness-of-fit test for Sedyakin's model. *Revue Roumaine de Mathematiques Pures et Appliquees*. 1997. Vol. 42. №1. P. 5–14.

7. Bagdonavicius V., Nikulin M. Accelerated Life Models: Modeling and Statistical Analysis. *Chapman&Hall*, 2002.

8. Bagdonavicius V., Kruopis J., Nikulin M.S. Non-parametric tests for censored data. *J. Wiley-ISTE*, 2011.

9. Nikulin M., Commenges D., Huber C. Probability, Statistics and Modelling in Public Health. *New-York: Springer*, 2006. 479 p.

10. Nikulin M.S., Limnios N., Balakrishnan N., Kahle W., Huber C. Advances in Degradation Modeling.

Applications to Reliability, Survival Analysis, and Finance. New-York: Birkhauser, 2010.

11. **Antonov A.V., Nikulin M.S.** Statisticheskiye modeli v teorii nadezhnosti: Ucheb. posobiye. M.: Abris (Vyssh. shk.), 2012. 390 s.:il.

12. **Antonov V., Huber C., Nikulin M., Polischook V.** (eds.) Longevity, Aging and Degradation Models in Reliability, Public Health, Medicine and Biology. *St. Petersburg: St. Petersburg State Polytechnic University.* 2004. Vol. 1. 368 p. (rus.)

13. **Vasilyev Yu.S., Dubarenko K.A., Yermilov V.V.** Upravleniye ustoychivym innovatsionnym razvitiyem Ros-sii : problemy operezhayushchey podgotovki kadrov v sisteme nepreryvnogo obrazovaniya. *Vysokiye intellektualnyye tekhnologii i innovatsii v natsionalnykh issledovatel'skikh universitetakh : materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii 17–18 fevralya 2011 g. : plenarnyye doklady / Mezhdunarodnaya akademiya nauk vysshey shkoly.* Sankt-Peterburgskoye otdeleniye; Sankt-Peterburgs. 2001. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НИКУЛИН Михаил Степанович — кандидат физико-математических наук почетный профессор университета г. Бордо, Франция; 3 ter place de la Victoire, case 35, F-33076, Bordeaux, Cedex, France; e-mail: mikhail.nikouline@u-bordeaux2.fr

СИЛЬНИКОВ Михаил Владимирович — доктор технических наук профессор директор института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, член-корреспондент РАН; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: director@mes.spbstu.ru

ДУБАРЕНКО Константин Андреевич — кандидат исторических наук доцент кафедры экстремальных процессов в материалах и взрывобезопасности института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: dekan_fkb@mail.ru

AUTHORS

NIKULIN Mikhail S. — Bordeaux University, France; 3 ter place de la Victoire, case 35, F-33076, Bordeaux, Cedex, France; e-mail: mikhail.nikouline@u-bordeaux2.fr

SILNIKOV Mikhail V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: director@mes.spbstu.ru

DUBARENKO Konstantin A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: dekan_fkb@mail.ru

УДК 614.849

В.В. Яковлев, М.В. Гравит, О.В. Недрышкин

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАСЧЕТА ПОЖАРНОГО РИСКА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕШЕХОДНОЙ ДИНАМИКИ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

V.V. Yakovlev, M.V. Gravit, O.V. Nedryshkin

DEVELOPMENT PROSPECTS SOFTWARE COMPLEX FIRE HAZARD CALCULATIONS PEDESTRIAN AND DESIGN PROCESS DYNAMICS UNDER FIRE

Проведен анализ нормативных документов в области расчета пожарного риска. Поставлена проблема игнорирования в современной методике использования методов расчета пешеходной динамики в условиях пожара с учетом психологических факторов. Предложены функциональные составляющие современного программного комплекса для расчета пожарного риска. Проведен сравнительный анализ существующих программных комплексов в области расчета пожарного риска. Дано заключение относительно функциональности исследуемых программных комплексов.

ПОЖАРНЫЙ РИСК; ПЕШЕХОДНАЯ ДИНАМИКА; МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКОГО ПОТОКА; ВРЕМЯ ЭВАКУАЦИИ; ЭМОЦИОНАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НА ПЕШЕХОДНУЮ ДИНАМИКУ.

The analysis of regulatory documents in the calculation of the fire risk. Actualized ignoring the problem in the use of modern methods of calculation methods pedestrian dynamics in fire conditions, taking into account psychological factors. Proposed functional components of modern software for the calculation of the fire risk. A comparative analysis of existing software systems in the calculation of fire risk. Given an opinion on the functionality of software systems studied.

FIRE RISK PEDESTRIAN DYNAMICS MODELS FOOT TRAFFIC; THE EVACUATION; THE EMOTIONAL IMPACT ON THE PEDESTRIAN DYNAMICS.

Риск предполагает ответственность за решения, принятые в условиях неопределенности. Данная ответственность реализуется при выполнении двух условий:

альтернативности (лицо, принимающее решение в той или иной ситуации должно иметь возможность выбора варианта действий, в том числе и бездействия);

стохастичности (решения принимаются в условиях недостаточной информации, при наличии случайных параметров, воздействий, случайно-го процесса развития событий).

Выбор варианта действий может быть осуществлен на основе решений, полученных при помощи математического моделирования, гарантирующего корректную оценку последствий и выбор оптимального варианта. Использование

при этом детерминистских, а не стохастических моделей оправдано лишь тем, что в математическом отношении первые проще, удобнее; во многих случаях модель процесса представима в виде систем дифференциальных уравнений, теория и методы исследования которых хорошо разработаны [1].

Пожарный риск — это своего рода мера возможной реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей [2].

Оценка пожарного риска проводится при разработке декларации пожарной безопасности или декларации промышленной безопасности на объектах, для которых они должны быть подготовлены в соответствии с законодательством Российской Федерации. При этом порядок про-

ведения расчетов пожарного риска определяется нормативными правовыми актами Российской Федерации, а именно: необходимость проведения расчетов обусловлена требованиями ст. 6, 53, 79 Федерального закона № 123-ФЗ от 22.07.2008 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [2].

Определение расчетных величин пожарного риска в зданиях и сооружениях различных классов функциональной пожарной опасности выполняется в соответствии с требованиями постановления Правительства РФ № 272 от 31.01.2009 г. «Правила проведения расчетов по оценке пожарного риска» [3]. Компоненты составляющих риска (критерии обеспечения безопасности) могут быть выражены аналитически так:

$$t_{\text{эв}} = \sum t_i \leq t_{\text{необ}}; \quad (1)$$

$$D_i \leq D_{\text{пр}}; \quad (2)$$

$$q_i = \frac{q_{i-1} \times b_i}{b_i} \leq q_{\text{max}}, \quad (3)$$

где t_i — время эвакуации людей на заданном участке, мин; $t_{\text{эв}}$ — время эвакуации людей с момента ее начала до момента выхода людей в зону безопасности вне здания, мин; $t_{\text{необ}}$ — время, необходимое (допустимое) для эвакуации людей до достижения опасными факторами на участках эвакуации уровней, угрожающих здоровью и жизни людей, мин; D_i — значение плотности людского потока на любом участке его эвакуации, чел./м²; $D_{\text{пр}}$ — предельно допустимая величина плотности людского потока, исключающая возможность образования таких их скоплений, в которых взаимное давление людей друг на друга может привести к физическому травматизму и удушью (компрессионная асфиксия), возникновению паники; q_i и q_{i-1} — интенсивность движения, чел./мин, людского потока на смежных — предшествующем ($i - 1$) и рассматриваемом (i) — участках эвакуационного пути, т. е. количество людей, проходящих в каждую минуту через поперечное сечение i -го участка пути; b_i и b_{i-1} — ширина смежных участков пути, м.

Для оценки эвакуации используют два параметра: необходимое время эвакуации до наступления поражающих факторов пожара и смоделированное время эвакуации. Формулы для расчета необходимого времени эвакуации учи-

тывают динамику образования токсичных веществ, выделяемых при горении. А формулы для расчета времени смоделированного процесса эвакуации людей учитывают плотность людского потока, геометрические параметры проекций людей и геометрические параметры внутренних помещений здания (лестницы, проемы, помещения, отсеки).

При определении фактического времени эвакуации людей из помещений и зданий для расчета необходимо выбрать модель движения. Расчет можно производить одним из следующих способов [4]:

по упрощенной модели движения людского потока (определяется время движения одного или нескольких людских потоков от наиболее удаленных мест нахождения людей через эвакуационные выходы (формулы (1)–(3));

по модели индивидуально-поточного движения людей из здания (устанавливается время выхода из здания последнего человека);

по имитационно-стохастической модели движения людских потоков (с учетом поведения людского потока, его реформирования и выравнивания плотности людского потока).

Ведущий комплекс в Российской Федерации, решающий поставленные задачи в области расчетов пожарных рисков, — «СИТИС» (разработан ООО «Ситис»). К достоинствам комплекса относятся: наглядный ввод и редактирование данных; демонстрация результатов расчета; воспроизведение движения людских потоков; детальное представление результатов отчета [5]; использование нескольких — аналитической, индивидуально-поточной, имитационно-стохастической — моделей движения людского потока; расчет необходимого времени эвакуации при помощи интегральной, полевой и зонной моделей.

Вместе с тем с точки зрения эффективности функционирования программы комплекс имеет ряд спорных функций, а именно:

визуализация данных не соответствует физической природе процесса [5];

выходные данные представляют собой массив, непригодный для моментального формирования отчета;

комплекс состоит из набора программ для решения частных задач (СИТИС: Флоутек, СИТИС: Блок, СИТИС: Эватек, СИТИС: Спринт).

Кроме программных комплексов «СИТИС», существуют и другие — Jasmine, Sofie, Fds, Phoenix, Fluent, Cfx, Фогард, GreenLine, TCalc, Z-Model, PojRCalc, Fenix. Комплексы TCalc и PojRCalc с сентября 2011 года предоставляются пользователям бесплатно [6]. В таблице сравниваются три наиболее широко распространенные программы, используемые в России [6].

В европейских и международных стандартах предложена методология выбора сценариев пожара и вероятностная оценка пожарного риска. В Российской Федерации принят ГОСТ Р 51901.10 «Менеджмент риска. Процедуры управления пожарным риском на предприятии» [7], являющийся аутентичным переводом международного стандарта ISO/TS 16732:2005 [8] «Fire safety engineering — Guidance on fire risk assessment» [«Разработка системы пожарной безопасности — Руководство по оценке пожарного риска»]. В развитие стандарта [7] разработан международный стандарт ISO/TS 16733:2006 «Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires» [«Разработка системы пожарной безопасности — Выбор сценариев пожаров и моделей пожаров»] [9], в котором описаны основные принципы отбора сценариев для анализа (а также исключения среди них «незначительных» с точки зрения последствий) и моделей пожаров. Основным недостатком детерминированного подхода считаются определенные консервативные предположения; прежде всего, это выбор наиболее неблагоприятного варианта пожара (так называемый «принцип максимального проектного пожара»). Детерминированный подход дает определенный запас надежности, однако величина этого запаса может стать причиной неоправданных материаль-

ных затрат на обеспечение пожарной безопасности объекта защиты. Вероятностный подход в этом отношении более гибок и совершенен, так как основан на более рациональном сопоставлении опасных факторов пожара, уровня безопасности людей, ожидаемого материального ущерба и, в конечном итоге, затрат на противопожарную защиту. Он дает возможность, например, рассмотреть ликвидацию пожара на ранних стадиях, что существенно снижает негативный эффект его последствий. Но, в свою очередь, при вероятностном подходе возможны ситуации, когда оценка последствий и/или вероятности какого-либо события затруднительна из-за отсутствия достаточного количества необходимой информации или статистических данных [10].

Необходимо отметить, что стохастический подход дает возможность учесть неопределенность как в значениях исходных данных, так и в поведении людей при эвакуации.

Документ PD 7974–7 «Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 7: Probabilistic risk assessment» («Применение принципов пожарно-технического анализа при проектировании зданий. Часть 7: вероятностная оценка пожарного риска») [11] является руководством по вероятностному анализу риска и представляет 7-ю часть серии документов PD 7974 (published documents), выпущенных в дополнение к британскому стандарту BS 7974 «Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. — Code of practice» («Применение принципов пожарно-технического анализа при проектировании зданий. Свод правил») [12]. Он содержит данные, основанные на статистике пожаров, параметрах здания и показа-

Сравнение расчетных моделей, реализованных в программных комплексах

| Расчетный параметр | Модель | Программный комплекс | | |
|-----------------------------|---|----------------------|-------------|--------|
| | | Фогард | Ситис | Fenix+ |
| Фактическое время эвакуации | Упрощенная аналитическая движения людского потока | + (Фогард-РВ) | + (Флоутек) | – |
| | Математическая индивидуально-поточного движения людей | – | + (Эватек) | + |
| | Имитационно-стохастическая движения людского потока | – | + (Флоутек) | – |
| Необходимое время эвакуации | Интегральная | + (Фогард-НВ) | + (ВИМ) | – |
| | Зонная | + (Фогард-НВ) | + (Блок) | – |
| | Полевая | – | – | + |

телях надежности систем противопожарной защиты, необходимые для вероятностной оценки риска, и критерии оценки, которые отражают «безопасность людей» и «безопасность имущества» в абсолютных и относительных показателях. Абсолютным критерием безопасности жизни/здоровья людей является число жертв/пострадавших в год, относительным — уровень риска (частота реализации в течение года событий, в которых люди подвергаются опасности); абсолютным критерием безопасности имущества является среднее значение убытков от пожаров в год, относительным — соотношение затрат/выгод (результаты технико-экономического анализа).

При вероятностной оценке риск рассматривается как функция двух параметров: частот опасных ситуаций и их последствий. Риск — это своего рода мера возможности того, что реализуется последовательность событий, и результатом анализа являются значения, выражающие определенный уровень опасности этих событий для людей или имущества, но также учитывающие, насколько они вероятны. Особенно важен в этом случае анализ событий, обладающих незначительными последствиями, но высокой вероятностью реализации, и событий, обладающих существенными последствиями, но низкой вероятностью реализации. Если события с существенными последствиями и высокими вероятностями всегда включаются в анализ, то события с незначительными последствиями и низкими вероятностями, как правило, исключаются. Для полной оценки риска согласно стандарту ISO/TS 16732:2005 [8] должна быть рассмотрена количественная оценка, условия получения которой определены стандартом ISO/TS 16733:2006 [9], [10].

Таким образом, констатируется общий для всех рассмотренных выше методологий расчета пожарного риска недостаток — отсутствие комплексного подхода к защите человека. Существующие международные и российские нормативные документы, описывающие принцип расчета пожарного риска, не характеризуют степень защищенности человека в условиях пожара. Данные модели описывают развитие пожара, критические факторы воздействия на организм человека, сценарии развития пожара, мобильность эвакуирующихся групп людей, но не учи-

тывают пешеходную динамику человека/толпы в условиях психологических факторов (паника). Последний может оказаться в некоторых ситуациях ключевым фактором, например если в момент пожара возникает паника, которая приводит к блокированию выходов эвакуирующимися в результате давки, падений людей в проходах и на лестничных маршах.

В психофизике известно несколько законов, описывающих отражение внешних воздействий в сенсорном пространстве человека. Их анализ показал, что устанавливаемой взаимосвязи в наибольшей степени может соответствовать так называемый всеобщий психофизический закон Вебера — Фехнера [13]. В той же работе приводятся данные о характере движения людского потока, зависящие от уровня психологического состояния людей (см. рис.) и плотности потока. О влиянии плотности потока на скорость его движения следует судить по относительному изменению значений скорости:

$$RD_j = (V_{\Delta 0j} - V_{\Delta Dj}) / V_{\Delta 0j}. \quad (4)$$

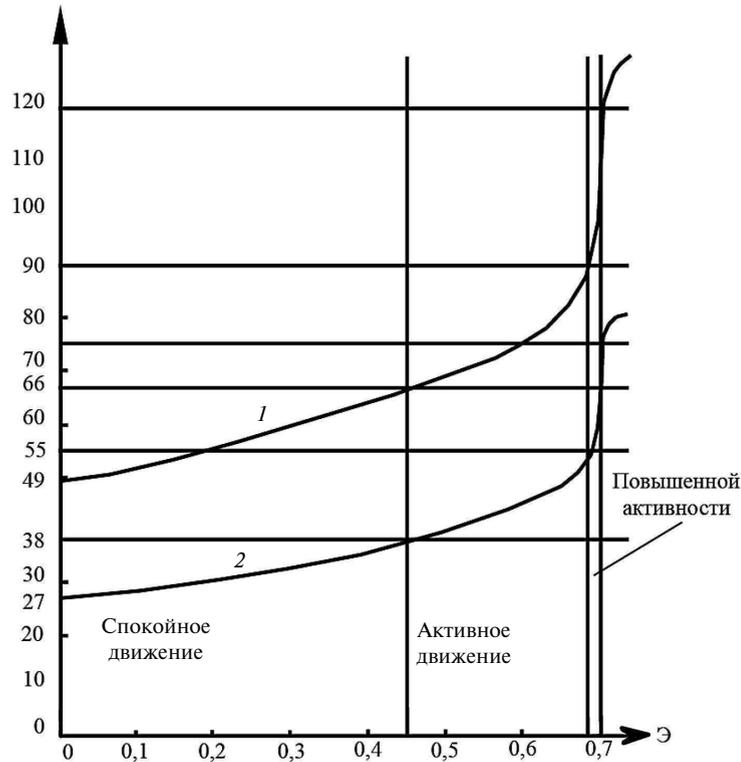
Тогда преобразовав формулу (5), получаем математическое выражение зависимости скорости потока от его плотности и уровня эмоционального состояния людей $V_D = \varphi(D, \Delta)$ для j -го участка пути:

$$V_{\Delta D,j} = V_{\Delta 0,j} (1 - R_{\Delta D,j}), \quad (5)$$

где V_0 — свободное движение людского потока; D — функция плотности людского потока; Δ — функция эмоционального воздействия на движение человека; V_D — скорость потока людей; R_D — относительное изменение скорости.

Общая зависимость случайной величины скорости движения людского потока от его плотности могла быть описана как элементарная случайная функция. Носителем случайности в ней является величина скорости свободного движения $V_{0\Delta}$, значения которой зависят от индивидуальных физических данных составляющих поток людей и особенностей их эмоциональных реакций на ситуацию [13]. С позиций методов математической статистики значение математического ожидания m скорости потока с достоверностью γ будет находиться в интервале

$$V_{0-\varepsilon} < m < V_{0+\varepsilon}; \quad (6)$$



Зависимости скорости потока людей от их эмоционального состояния: 1 — по горизонтальному пути, через проем, по лестнице вниз; 2 — по лестнице вверх

$$\varepsilon = \frac{U_{1+\gamma}}{\sqrt{n}} S, \quad (7)$$

где S — выборочное среднее квадратическое отклонение скорости потока; $\frac{U_{1+\gamma}}{2}$ — квантиль нормального закона распределения; n — объем выборки или общее ожидаемое число людей в потоке [1].

Влияние подобных процессов (и других, инициатором которых может послужить психологическое воздействие паники и стресса) при эвакуации на результат времени эвакуации бесспорен, однако существующие программные комплексы их не описывают. Следовательно, с увеличением времени эвакуации растет вероятность воздействия поражающих факторов пожара на еще не эвакуировавшихся людей, что ведет к увеличению пожарного риска.

Современный программный комплекс по расчетам пожарных рисков должен учитывать опасные факторы пожара, варианты развития пожара

и моделировать динамику эвакуирующихся с учетом психофизических факторов. Моделирование должно основываться не только на физических параметрах, но и на психических [14]. Смоделированная пешеходная динамика людей в условиях пожара должна быть адекватна реальности: результат моделирования не должен «подгоняться» под значение наступления критического фактора (тепловое излучение, наличие кислорода, потеря видимости, концентрация угарного газа). Адекватную математическую модель поведения толпы целесообразно создавать на основе нейронных сетей, но это не исключает уже существующие методы описания пешеходной динамики.

Как представляется авторам, в перспективе модификации программ по расчету пожарного риска должна быть предусмотрена разработка архитектуры универсального программного комплекса, способного рассчитывать пожарный риск с учетом выбранных законодательных баз, опасных факторов пожара и реалистичной модели пешеходной динамики, отражающей поведение людей в экстремальных условиях

пожара. Предполагается следующий набор необходимых функциональных особенностей такого комплекса:

стабильность работы за счет сохранения по технологиям облачной системы хранения данных промежуточных результатов;

содержание в программных отчетах конечных данных, не нуждающихся в последующем редактировании;

использование различных моделей пешеходной динамики (упрощенно-аналитическая, индивидуально-поточная, имитационно-стохастическая);

возможность расчета риска по различным нормативным документам;

учет психологических особенностей и профессиональной подготовки эвакуируемого персонала;

отображение всех сценариев пожара и выбор наиболее вероятного;

универсальность комплекса, содержащего единую программу для расчета фактического и необходимого времени эвакуации;

настройка последовательности вывода данных в конечный отчет, а также редактирования текстового шаблона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Яковлев В.В.** Экологическая безопасность, оценка риска. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. 501 с.

2. **Технический регламент** о требованиях пожарной безопасности: Федеральный Закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ.

3. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: приказ МЧС России от 30.06.2009 г. № 382; введ. 30.06.2009 г. / ФГУ ВНИИПО МЧС России // Российская газета. 2009. № 161.

4. **Туманов А.Ю., Недрышкин О.В., Волков А.П.** Методика комплексной многофакторной рейтинговой оценки безопасности и риска социально-значимых объектов // Сб. науч. тр. IV Всероссийской научно-практ. конф. «Безопасность в чрезвычайных ситуациях». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 102–108.

5. Заключение специалистов Академии ГПС МЧС России о возможности использования компьютерных программ «СИТИС:Флоутек». <http://sitis.ru/media/documentation/FLT-academia.pdf>

6. **Сухотина М.А., Тихонова Н.В.** Программные комплексы, используемые для определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооруже-

ниях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 4. С. 46–49.

7. **ГОСТ Р 51901.10.** Менеджмент риска. Процедуры управления пожарным риском на предприятии.

8. **ISO/TS 16732:2005.** Fire safety engineering — Guidance on fire risk assessment

9. **ISO/TS 16733:2006.** Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires.

10. **Гилетич А.Н., Еремина Т.Ю., Тихонова Н.В.** Применение международных стандартов BS 7974 и ISO/TS 16733 при оценке пожарного риска // Архитектура и строительство России. 2013. № 2. С. 30–39.

11. **PD 7974–7.** Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 7: Probabilistic risk assessment.

12. **BS 7974.** Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice.

13. **Холщевников В.В., Самошин Д.А.** Эвакуация и поведение людей при пожарах: Учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. 212 с.

14. **Короленко Ц.П.** Психофизиология человека в экстремальных условиях. Л., 1978.

REFERENCES

1. **Yakovlev V.V.** Ekologicheskaya bezopasnost, otsenka riska. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2008. 501 s. (rus.)

2. **Tekhnicheskii reglament** o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti: Federalnyy Zakon № 123-FZ ot 22 iyulya 2008 g. (rus.)

3. Metodika opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroyeni-yakh razlichnykh klassov funktsionalnoy pozharnoy opasnosti: prikaz MChS Rossii ot 30.06.2009 g. № 382; vved.

30.06.2009 g. / FGU VNIIPPO MChS Rossii. *Rossiyskaya gazeta*. 2009. № 161, 2009. (rus.)

4. **Tumanov A.Yu., Nedryshkin O.V., Volkov A.P.** Metodika kompleksnoy mnogofaktornoy reytingovoy otsenki bezopasnosti i riska sotsialno-znachimyykh obyektoy. *Sbornik nauchnykh trudov IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Bezopasnost v Chrezvychaynykh Situatsiyakh»*. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012. Str. 102–108. (rus.)

5. Zaklyucheniye spetsialistov Akademii GPS MChS Rossii o vozmozhnosti ispolzovaniya kompyuternykh programm «SITIS:Floutek». <http://sitis.ru/media/documentation/FLT-academia.pdf>

6. **Sukhotina M.A., Tikhonova N.V.** Programmnyye komplekсы, ispolzuyemyye dlya opredeleniya raschetnykh velichin pozhnarogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroyeniyakh razlichnykh klassovfunktsionalnoy pozhnaroy opasnosti. *Pozharovzryvobezopasnost.* 2012. № 4. S.46–49. (rus.)

7. **GOSTR 51901.10.** Menedzhment riska. Protsedury upravleniya pozhnarnym riskom na predpriyatii. (rus.)

8. **ISO/TS 16732:2005.** Fire safety engineering — Guidance on fire risk assessment.

9. **ISO/TS 16733.2006.** Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires.

10. **Giletich A.N., Yeremina T.Yu., Tikhonova N.V.** Primeneniye mezhdunarodnykh standartov BS 7974 i ISO/TS 16733 pri otsenke pozhnarogo riska. *Arkhitektura i stroitelstvo Rossii.* 2013. № 2. S. 30–39. (rus.)

11. PD 7974–7 «Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 7: Probabilistic risk assessment».

12. BS 7974 «Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. — Code of practice». (rus.)

13. **Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A.** Evakuatsiya i povedeniye lyudey pri pozharakh: Ucheb. posobiye. M.: Akademiya GPS MChS Rossii, 2009. 212 s. (rus.)

14. **Korolenko Ts.P.** Psikhofiziologiya cheloveka v ekstremalnykh usloviyakh. Leningrad, 1978. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЯКОВЛЕВ Вячеслав Владимирович — доктор технических наук профессор кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: vv-yakovlev@yandex.ru

ГРАВИТ Марина Викторовна — кандидат технических наук доцент заместитель заведующего по НИРС кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: marina.gravit@mail.ru

НЕДРЫШКИН Олег Вячеславович — студент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: nedryshkin@gmail.com

AUTHORS

YAKOVLEV Vyacheslav V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vv-yakovlev@yandex.ru

GRAVIT Marina V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: marina.gravit@mail.ru

NEDRYSHKIN Oleg V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nedryshkin@gmail.com



УДК 371.315

В.И. Гуменюк, М.В. Гравит, А.М. Кармишин

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

V.I. Gumenuk, A.M. Gravit, A.M. Karmishin

PROBLEM QUESTIONS OF OPTIMIZATION MEANS AND METHODS FOREST FIRE EXTINGUISHING

В статье рассматриваются теоретические аспекты оптимизации средств и способов тушения лесных пожаров, наносящих большой материальный ущерб многим странам мира. В качестве средства тушения лесных пожаров рассматривается выливной авиационный прибор, а в качестве способа тушения — вылив огнетушащего состава из выливного прибора, расположенного на летательном аппарате.

ЛЕСНОЙ ПОЖАР; ВЫЛИВНОЙ ПРИБОР; ФАКТОРНЫЙ ЗАКОН ПРЕКРАЩЕНИЯ ОГНЯ; ОПТИМАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ОГNETУШАЩЕГО СОСТАВА; ПОЛИДИСПЕРСНОЕ ОБЛАКО; ПЛОТНОСТЬ ОТЛОЖЕНИЯ ОГNETУШАЩЕГО СОСТАВА; ОПТИМИЗАЦИЯ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ ТУШЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА.

In the article examines theoretical aspects of optimization means and ways of extinguishing forest fires, causing great physical harm to many countries around the world. As a means of extinguishing of forest fires regarded spray tanks, and as a fire extinguishing agent — extinguishing agent of the having poured out of the pouring of the device located on aircraft.

WILDFIRE; POURER APPLIANCE; FACTORIAL LAW; CEASEFIRE; OPTIMAL DENSITY; EXTINGUISHING AGENTS SHALL; POLYDISPERSITY OF CLOUD; DEPOSITION DENSITIES EXTINGUISHING AGENT; OPTIMIZATION MEANS AND WAYS FOREST FIRE EXTINGUISHING.

Тушение лесных пожаров — одна из проблем многих стран мира, в том числе и Российской Федерации. Актуальность и сложность ее связана с тем, что лесные пожары наносят большой материальный ущерб и требуют значительных материальных затрат на тушение.

Большие масштабы пожаров, их труднодоступность при тушении и зачастую отдаленность от населенных пунктов и водоемов требуют разработки методов, способов и средств тушения. Одним из перспективных способов тушения лесных пожаров является вылив воды с летательных аппаратов, для чего должны быть разработаны соответствующие средства — выливные приборы (ВП).

Рассмотрим некоторые теоретические вопросы тушения пожара, позволяющие оптимизировать технические характеристики ВП и способы их применения.

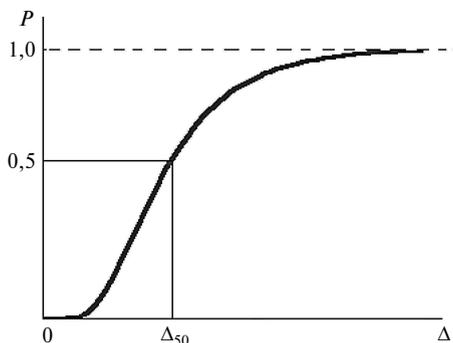
1. Используя некоторые аналогии с другими вопросами [1, 2], в рассмотрение можно ввести

такую количественную характеристику огнетушащего состава, которая и будет определять возможность прекращения огня, как масса огнетушащего состава, подаваемая на единицу площади горения. Поскольку тушение пожара — стохастический процесс, то связь между вероятностью прекращения горения и количеством Δ , г·м⁻², огнетушащего состава, подаваемого на единицу площади горения, может быть описана следующим образом (см. рис.):

$$P(\Delta) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{k_{\ln \Delta}} \ln \frac{\Delta}{\Delta_{50}} \right) \right], \quad (1)$$

где Δ_{50} и $\sqrt{k_{\ln \Delta}}$ — параметры закона.

Параметры закона (1) (Δ_{50} — масса огнетушащего состава, подаваемая на единицу поверхности, при которой горение прекращается с вероятностью 0,5, и $\sqrt{k_{\ln \Delta}}$) зависят от многих факторов и должны устанавливаться экспериментально. При прочих равных условиях пара-



Зависимость вероятности прекращения горения от количества огнетушащего состава, подаваемого на единицу площади горения

метр закона (1) Δ_{50} зависит от дисперсности частиц аэрозоля огнетушащего состава (воды).

Уже на уровне факторного закона прекращения горения (1) можно ввести в рассмотрение оптимальную плотность огнетушащего состава $\Delta_{\text{опт}}$, подаваемую на единицу поверхности пожара. Под оптимальной понимается такая плотность $\Delta_{\text{опт}}$, при которой вероятность прекращения горения в расчете на единицу плотности принимает максимальное значение, то есть

$$\frac{P}{\Delta} = \frac{0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{k_{\ln \Delta}} \ln \frac{\Delta}{\Delta_{50}} \right) \right]}{\Delta} = \max, \quad (2)$$

где $\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt$ — интеграл ошибок

Для нахождения оптимальной плотности $\Delta_{\text{опт}}$ найдем производную от уравнения (2) по Δ и приравняем ее к нулю. Результаты численного решения уравнения (2) относительно оптимальной величины $\Delta_{\text{опт}}$ и соответствующей ей оптимальной вероятности прекращения горения представлены в таблице.

2. Формирование плотностей отложения огнетушащего состава при его выливе из ВП. Как

известно, при выливе из ВП жидких составов образуется полидисперсная система частиц. Как показал академик А.Н. Колмогоров [3], при дроблении среды любым способом распределение образующихся частиц по их размерам асимптотически стремится к логарифмическому нормальному закону, откуда следует, что и распределение массы образующихся частиц аэрозоля по их размерам также описывается логарифмическим нормальным законом

$$f_m(d) = \frac{dm}{M_0 dd} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln d} d} e^{-\frac{\left(\ln \frac{d}{d_{em}}\right)^2}{2\sigma_{\ln d}^2}}, \quad (3)$$

где $f_m(d)$ — дифференциальная функция распределения массы вещества по размерам частиц (имеет размерность d^{-1}); $\sigma_{\ln d}$ — параметр закона (среднее квадратичное отклонение натурального логарифма d); d — диаметр частицы, выражаемый в единицах длины (наиболее часто размер частицы выражается в миллиметрах и микрометрах); d_{em} — параметр закона (медианный размер частиц).

Среднемассовый диаметр d_m образующихся при выливе частиц зависит от скорости полета самолета, диаметра выливного отверстия (d_b), физико-химических характеристик (σ — поверхностное натяжение, ρ — плотность, η — вязкость) огнетушащего состава, начальной скорости (относительно воздуха) вылива u , скорости вылива Q и может быть рассчитан по формуле М.К. Баранаева

$$d_m = 3,5 \left(\sqrt{\frac{\sigma}{u^2 \rho}} + 1,4 \sqrt{\frac{\eta}{u \rho}} \right) \sqrt[6]{\frac{Q d_b}{0,01 u}}. \quad (4)$$

Поскольку частицы различных размеров оседают под действием силы тяжести с различной скоростью, то из закона распределения массы частиц по их размерам следует закон распределения массы частиц по скоростям оседания $f_m(w)$. Существуют три режима оседания частиц

Оптимальное значение параметров огнетушения

| | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\sqrt{k_{\ln \Delta}}$ | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 1,06 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 |
| $\frac{\Delta_{\text{опт}}}{\Delta_{50}}$ | 0,30 | 0,89 | 1,11 | 1,15 | 1,34 | 1,31 | 1,27 | 1,21 | 1,17 | 1,14 |
| $P_{\text{опт}}$ | 0,20 | 0,45 | 0,56 | 0,58 | 0,80 | 0,87 | 0,91 | 0,95 | 0,96 | 0,97 |

аэрозоля: стоксовский, промежуточный и ньютоновский. Стоксовский режим оседания характерен для маленьких, легких частиц, у которых можно пренебречь силами лобового сопротивления. Ньютоновский режим оседания частиц под действием силы тяжести характерен для крупных частиц, имеющих большую поверхность, у которых можно пренебречь силами вязкости воздуха. Промежуточный режим оседания частиц наблюдается у не очень крупных, но и не очень мелких частиц, у которых на скорость гравитационного оседания влияют и силы лобового сопротивления и силы вязкости воздуха. Скорость гравитационного оседания частицы может быть рассчитана по следующему уравнению:

$$\omega = \begin{cases} 31\rho d^2, & \text{— область Стокса;} \\ 4,2\rho^{0,715}d^{1,145} & \text{— промежуточная область;} \\ 4,9\rho^{0,5}d^{0,5} & \text{— область Ньютона,} \end{cases}$$

где d — диаметр частицы, мм; ρ — плотность частицы, г·см⁻³; w — скорость гравитационного оседания частицы, м·с⁻¹.

В дальнейшем образовавшаяся полидисперсная система частиц распространяется в атмосфере, формируя плотность отложения огнетушащего состава на поверхности земли, или в более общем случае — интегральный удельный поток примеси на высоте z . Исходя из теории оптимальных полей при выливе огнетушащего состава необходимо формировать линейный источник, расположенный перпендикулярно ветру. Плотность отложения полидисперсной системы частиц на поверхности земли может быть описана с использованием математических моделей рассеивания оседающей и взаимодействующей с подстилающей поверхностью монодисперсной примеси [4–10]. Так, для полидисперсной примеси

$$\Delta(x, y, z) = M_0 \varphi(y) \int_0^{\infty} \psi(x, 0, z, w, H, \beta) f_m(w) dw, \quad (5)$$

где $\varphi(y)$ и $\psi(x, 0, z, H, \beta)$ — функции, описывающие распределение огнетушащей примеси по осям y и z , имеющие соответственно размерность м⁻¹ и с·м⁻¹; $f_m(w)$ — плотность распределения массы образующихся при выливе частиц по скоростям гравитационного оседания, с·м⁻¹ (описывается логарифмическим нормальным законом).

Если каждую точку поля плотностей распределения огнетушащей смеси перевести в вероятность прекращения горения, то получим некоторое поле вероятностей $G(x, y, z)$, которое служит наиболее полным показателем качества выливного прибора. Интегральным показателем качества ВП является условная площадь S_0 , в пределах которой вероятность тушения пожара равна единице

$$S_0 = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} G(x, y, z = \text{const}) dx dy.$$

При реальных условиях тушения лесных пожаров именно этот показатель требует оптимизации, а именно его максимизации.

Создание оптимальных плотностей огнетушащего состава достигается применением нескольких летательных аппаратов, которые должны выливать огнетушащие составы с оптимальным смещением по оси x , в результате чего будет происходить наложение полей и формироваться оптимальная плотность отложения огнетушащего состава.

Исходя из физического смысла S_0 интегральный показатель качества ВП позволяет решать различные прикладные задачи, имеющие важное практическое значение:

оптимизировать технические характеристики ВП (диаметр выливного отверстия, скорость вылива и, соответственно, длину вылива);

для заданных условий пожара оптимизировать способ применения ВП — высоту вылива, скорость полета самолета;

рассчитывать необходимое количество средств (самолетовылеты) для тушения пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармишин А.М., Киреев В.А. Математические методы фармакологии, токсикологии и радиобиологии: монография. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: ООО «АПР», 2011. 330 с.

2. Кармишин А.М., Киреев В.А. Карнюшкин А.И. Оценка опасности воздействия опасных факторов пожара // Актуальные проблемы пожарной безопасности: Тезисы докладов XXI Меж-

дународной научно-практической конференции. Ч. 1. М.: Изд-во ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. С. 16–21.

3. **Колмогоров А.Н.** О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР. 1941. Т. 31, № 2. С. 99.

4. **Гандин Л.С., Соловейчик Р.Э.** О распространении дыма из фабричных труб // Труды ГГО. Вып. 77.

5. **Монин А.С.** О граничном условии на поверхности земли для диффундирующей примеси в приземном слое воздуха при устойчивой стратификации // В кн.: Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. М.: Изд-во иностр. литературы, 1962. С. 477–478.

6. **Бызова Н.Л., Куценогий К.П.** Влияние структуры приземного слоя атмосферы и граничного условия на величину дозы и плотность отложений аэрозольной примеси // Труды ИЭМ. 1976. Vol. 60. Вып. 15. С. 5–15.

7. **Кармишин А.М., Карнюшкин А.И., Киреев В.А.** Актуальные проблемы оценки простран-

ственно-временных показателей опасности техногенных аварий // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: VIII научно-практическая конференция. 8–10 октября 2008 г. Доклады и выступления. СПб.: Изд-во УГПС МЧС России, 2009. С. 199–210.

8. **Кармишин А.М., Киреев В.А., Гуменюк В.И.** О количественных показателях опасности техногенных аварий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2(171). С. 289–299.

9. **Кармишин А.М., Киреев В.А., Гуменюк В.И.** Оценка пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: сб. науч. тр. V всеросс. научно-практ. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 70–77.

10. **Кармишин А.М., Киреев В.А., Карнюшкин А.И. [и др.]** К вопросу об оценке опасных факторов пожара // Проблемы прогнозирования ЧС. — IX РПК 14–15 мая 2009 г. Проблемы прогнозирования ЧС. — М.: Центр «Антистихия», 2009. С. 158–163.

REFERENCES

1. **Karmishin A.M., Kireyev V.A.** Matematicheskiye metody farmakologii, toksikologii i radiobiologii: monografiya. Izd. 2-e, pererab. i dop. — M.: ООО «APR», 2011. 330 s. (rus.)

2. **Karmishin A.M., Kireyev V.A., Karnyushkin A.I.** Otsenka opasnosti vozdeystviya opasnykh faktorov pozhara. Aktualnyye problemy pozharной bezopasnosti: Tezisy dokladov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ch. 1. M.: Izd-vo FGU VNIPO MChS Rossii, 2009. S. 16–21. (rus.)

3. **Kolmogorov A.N.** O logarifmicheski-normalnom zakone raspredeleniya razmerov chastits pri droblenii. DAN SSSR. 1941. T. 31, №2. S. 9. (rus.)

4. **Gandin L.S., Soloveychik R.E.** O rasprostraneni dyma iz fabrichnykh trub. — *Trudy GGO*. Вып. 77. (rus.)

5. **Monin A.S.** O granichnom uslovii na poverkhnosti zemli dlya diffundiruyushchey primesi v prizemnom sloye vozdukha pri ustoychivoy stratifikatsii. V kn.: *Atmosfernaya diffuziya i zagryazneniye vozdukha*. M. Izd-vo inostrannoy literatury, 1962. S. 477–478. (rus.)

6. **Byzova N.L., Kutsenogiy K.P.** Vliyaniye struktury prizemnogo sloya atmosfery i granichnogo usloviya na velichinu dozy i plotnost otlozheniy aero-

zolnoy primesi. *Trudy IEM*. 1976. Вып. 15 (60). S. 5–15. (rus.)

7. **Karmishin A.M., Karnyushkin A.I., Kireyev V.A.** Aktualnyye problemy otsenki prostranstvenno-vremennykh pokazateley opasnosti tekhnogennykh avariyy. *Problemy prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy. VIII nauchno-prakticheskaya konferentsiya. 8–10 oktyabrya 2008 g. Doklady i vystupleniya*. SPb.: Izd-vo UGPS MChS Rossii, 2009. S. 199–210.

8. **Karmishin A.M., Kireyev V.A., Gumenyuk V.I.** O kolichestvennykh pokazatelyakh opasnosti tekhnogennykh avariyy. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 2(171). S. 291–299.

9. **Karmishin A.M., Kireyev V.A., Gumenyuk V.I.** Otsenka prostranstvenno-vremennykh pokazateley opasnosti tekhnogennykh avariyy. *Bezopasnost v chrezvychaynykh situatsiyakh: sbornik nauchnykh trudov V serossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2013. S. 70–77. (rus.)

10. **Karmishin A.M., Kireyev V.A., Karnyushkin A.I. [i dr.]** K voprosu ob otsenke opasnykh faktorov pozhara. *Problemy prognozirovaniya ChS. — IX RPK 14–15 maya 2009 g. Problemy prognozirovaniya ChS*. M.: Tsentr «Antistikhiya», 2009. S. 158–163. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУМЕНЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

ГРАВИТ Марина Викторовна — кандидат технических наук доцент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: marina.gravit@mail.ru

КАРМИШИН Александр Михайлович — доктор технических наук профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, г. Москва, Россия; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

AUTHORS

GUMENYUK Vasily I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

GRAVIT, Marina V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: marina.gravit@mail.ru

KARMISHIN Alexander M. — Doctor of Science, Professor; Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2-nd Bauman Str. 5, Moscow, Russia; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

УДК 53:37.016

Н.М. Кожевников

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ИДЕИ В СОВРЕМЕННОМ КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

N.M. Kozhevnikov

NON-CLASSICAL IDEAS IN THE CONTEMPORARY GENERAL PHYSICS COURSE

Анализируется эволюция курса общей физики за последние сто лет. Приведена содержательная и методическая характеристика наиболее известных в начале XX века учебных пособий по физике. Показано, что становление неклассической физики в начале прошлого столетия носило сложный, драматический характер, в результате которого преподавание физики перешло от индуктивно-исторической к дедуктивно-теоретической концепции. Современные курсы общей физики фактически являются словарями-справочниками для подготовки студентов к централизованному тестированию. Обсуждаются пути преодоления негативных тенденций в преподавании общей физики в вузах.

КУРС ОБЩЕЙ ФИЗИКИ; КЛАССИЧЕСКАЯ ФИЗИКА; ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ЭМПИРИЧЕСКИЙ КОМПОНЕНТЫ КУРСА; НЕКЛАССИЧЕСКАЯ ФИЗИКА МИКРОМИРА; ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ СТАНДАРТ 3-ГО ПОКОЛЕНИЯ; НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ СОВЕТ ПО ФИЗИКЕ МИНОБРНАУКИ; ПРИМЕРНАЯ ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ВУЗОВ.

Evolution of the general physics course in the last century is analyzed. The content and methodological characteristics of text-books on physics popular at the beginning of XX century are presented. It is shown that dramatic rise of non-classical physics was followed by transition from inductive-historical to deductive-theoretical education paradigm. Contemporary general physics courses are in fact dictionary-reference books for students who want to prepare for central testing. Some ways to overcome negative tendencies in physics teaching are discussed.

GENERAL PHYSICS COURSE; CLASSICAL PHYSICS; EMPIRICAL AND THEORETICAL COMPONENTS OF THE COURSE; NON-CLASSICAL PHYSICS OF THE MICROWORLD; FEDERAL STATE EDUCATIONAL STANDART OF THE 3-D GENERATION; SCIENCE-METHODOLOGICAL COUNCIL ON PHYSICS AFFILIATED TO MINISTRY ON SCIENCE AND EDUCATION; EXEMPLARY PROGRAM OF GENERAL PHYSICS COURSE FOR UNIVERSITIES.

Многое в преподавании школьной и вузовской физики вызывает беспокойство. Снижается интерес школьников к этому предмету. В 2013 году почти каждый седьмой выпускник средней школы получил двойку на ЕГЭ по физике. Сокращается базовая трудоемкость физики в вузах, где почти повсеместно переходят на одно- и двухсеместровый курс по минималь-

ной программе. Из ряда естественнонаучных направлений бакалавриата физика уже исчезла полностью. С ностальгией вспоминается не столь отдаленное время, когда американские президенты ставили нас в пример по организации преподавания физики.

Почему так получилось, что физика перестает быть наиболее авторитетным носителем

знаний об окружающем мире? Почему наши коллеги из учебно-методических объединений вузов, утверждавшие федеральные государственные стандарты (ФГОС-3), так спокойно секвестировали физику? Как вернуть физике достойное место в системе современного образования?

Чтобы разобраться в этом, полезно проследить эволюцию курса физики за последние столетия. Увидеть, как углубление наших знаний о микромире привело к отказу от наглядных представлений о физических процессах в природе. Убедиться в том, что абстрактный язык и необычная логика рассуждений в неклассической физике, вызывающая отторжение даже у искусственных физиков, требуют особых педагогических подходов, суть которых, увы, до сих пор не сформулирована.

Классическая физика в учебных программах высшего образования

На рубеже XIX–XX веков в вузах и университетах преподавалась классическая физика. Вспоминает выдающийся ученый-гидромеханик Лев Герасимович Лойцянский [1]: «Отмечу как большую жизненную удачу то, что в Петроградском университете в 1917/18 учебном году мне привелось прослушать (и сдать) пользовавшийся заслуженной славой годовой общий курс физики, читавшийся известным ученым и замечательным педагогом Орестом Даниловичем Хвольсоном».

Никаких новых веяний, типа представлений об атомном строении вещества и теории относительности, этот курс не содержал. Большое

внимание уделялось получению и обработке результатов измерений. Вот типичное название одного из параграфов: «Наблюдение качаний коромысла (весов — *H.K.*)». Все расчеты производились на уровне школьной арифметики, хотя встречались и интегралы, например $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$.

Первый том курса Хвольсона вышел в 1897 году, к 1923 году он выдержал уже пять изданий [2]. Объем первого тома — 675 страниц. Это был не учебник, а скорее, энциклопедия классической физики. Сюда вошли (по отделам) механика, измерительные приборы и методы измерений, учение о газах, учение о жидкостях, учение о твердых телах. Вводную часть этого тома и сейчас можно смело рекомендовать как прекрасное пособие по курсу концепции современного естествознания.

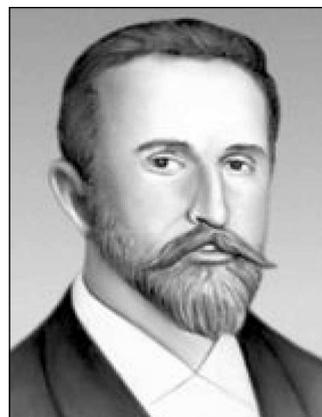
Л.Г. Лойцянский продолжает: «Орест Данилович читал лекции, сидя в кресле, иногда замолкая и бледнея от каких-то спазмов, а писание формул на доске, также как и проведение опытов выполнялось его ассистентом. Это нисколько не мешало поразительной красочности лекций Хвольсона, не утомлявших, а ласкавших слух студентов».

Возможно, переиздание курса Хвольсона было бы полезно, но вряд ли имело бы коммерческий успех. Хотя, несомненно, каждый преподаватель физики должен хотя бы полистать эти замечательные книги.

Однако не надо думать, что все курсы физики на рубеже XIX–XX веков были такими гран-



О.Д. Хвольсон
1852–1934



В.А. Михельсон
1860–1927

диозными по объему и охвату фактического материала. Были и такие, которые предназначались для подготовки инженеров, агрономов, врачей и т. п. по сокращенным программам. Среди таких курсов очень популярным был прекрасный двухтомный курс Владимира Александровича Михельсона, первое издание которого вышло в 1922 году [3]. Замечательный язык, вдумчивый анализ вопросов, размышления о сути физических явлений — эти и другие достоинства курса Михельсона не потеряли своей актуальности и сейчас [4]. По крайней мере, авторы книг по физике начала XX века в первую очередь старались объяснить студентам учебный материал, а не просто сообщить им определенный набор фактов и формул, а затем с пристрастием спросить их на экзамене.

В 1930 году вышло первое издание всемирно известного курса Р. Поля, состоящего из нескольких томов [5]. Это уникальное издание, не имеющее аналогов в мире, целиком построено на эксперименте (хотя, конечно, в курсе есть и формулы, и обсуждение моделей). Р. Поль работал в Геттингене, где до сих пор имеется великолепная физическая лаборатория, физический кабинет и музей физики. Автору посчастливилось воочию убедиться, какое значение придается в Геттингенском университете физическому эксперименту [6].

В целом преподавание классической физики вплоть до начала XX века характеризовалось чрезвычайной гармоничностью, устойчивостью, «солидностью» и в полной мере удовлетворяло требованию формирования материалистического мировоззрения специалистов и научно-технического базиса современной техники.

Ортодоксальный классицизм и неклассический «идеализм» в физике начала XX века

«Вопрос заключается в том: достаточно ли новая теория безумна, чтобы иметь шанс быть истинной.»

Н. Бор

Главным событием в физике начала XX века стал переход к квантово-релятивистской картине микромира. Новая физика сломала общепринятые представления об описании и интерпретации физических явлений. Будучи с точки зрения классической физики «сумасшедшими»,

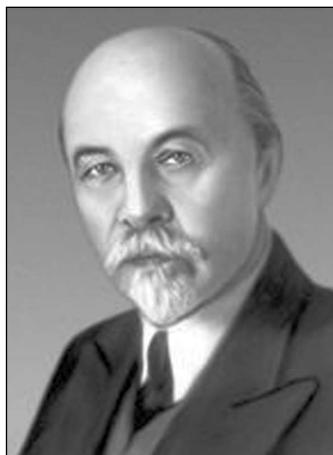
«безумными» (см. эпитафию с высказыванием Н. Бора), законы микромира отвергали такие сложившиеся веками концепции, как детерминизм, причинность, объективность знания, независимость законов природы от наблюдателя и т. п.

Зарождение неклассической физики происходило в острейшей борьбе, описанной в многочисленной исторической и философской литературе. Даже основоположники новой физики испытывали дискомфорт, пытаясь свети «концы с концами». Автор концепции квантов М. Планк писал, что его работа 1900-го года была «актом отчаяния» [7]. Многие относились к квантовой механике как к промежуточной теории, противоречия которой будут со временем устранены [8].

В Советском Союзе ареной бурных дискуссий между представителями классической и неклассической физики в 1920–30 годы стал Ленинградский политехнический институт [9]. В частности, одним из вопросов дискуссии была природа электромагнитного поля. С одной стороны, академик В.Ф. Миткевич отстаивал классическую теорию эфира и связанную с ней концепцию близкодействия, а с другой стороны, член-корреспондент АН СССР Я.И. Френкель категорически отрицал эфир и настаивал на концепции дальнодействия через пустоту. Эта дискуссия, затянувшаяся почти на десять лет, стала предметом обсуждения на Президиуме АН СССР в 1937 году и на страницах одноименного философского журнала «Под знаменем марксизма». Постепенно участники дискуссии «выдохлись», и она закончилась ничем.

Не менее остро спорили ученые о «разлетающейся Вселенной» (теория Эйнштейна — Фридмана — Леметра), о парадоксах только что созданной квантовой механики и т. д. Получив ярлык «физических идеалистов», многие из физиков привлекли к себе внимание репрессивных органов [9].

Оглядываясь на этот сложный исторический период, можно сказать, что новые представления в физике стали не ожидаемым откровением для большинства ученых, а скорее, горькой необходимостью перехода к дискомфортному существованию в новых непривычных условиях. Недаром великий физик Г.А. Лоренц в разговоре с А.Ф. Иоффе как-то сказал: «Я потерял уве-



В.Ф. Миткевич
1872–1951



Я.И. Френкель
1894–1952

ренность, что моя научная работа вела к объективной истине, и я не знаю, зачем жил; жалею только, что не умер пять лет назад, когда мне еще все представлялось ясным». С этой фразой Лоренца перекликается известное высказывание М. Планка: «Новые идеи побеждают после того, как вымрут сторонники старых идей».

В этих условиях особенно остро встал вопрос о том, как преподавать физику в средней и высшей школе. На решение этого вопроса повлияла не только его сложность, но и социально-политическая обстановка в Советском Союзе.

Переход к дедуктивно-теоретическому преподаванию курса общей физики

Активными участниками создания новой физики были молодые советские ученые, которым в ту пору было всего 20–30 лет. Они не только открыли законы микромира, но и способствовали революционным преобразованиям в преподавании физики. Апофеозом этой революции стала публикация «Курса теоретической физики» Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица, который до сих пор совершенно справедливо считается Библией теоретической физики. Имея благородную цель поднять уровень подготовки физиков-теоретиков, курс не без влияния политического руководства страны, явно «перевыполнил свою задачу»*. Став эталоном учебника, Курс

* По иронии судьбы работа над Курсом началась в 1938 году, когда вышел в свет «Краткий курс истории ВКП(б)» И.В. Сталина. И если в начале ра-

распространил свое влияние на преподавание физики на всех уровнях.

Это означало переход от индуктивно-исторического к теоретико-дедуктивному изложению физики [10]**.

В связи с этим уместно вспомнить, что Ландау имел весьма радикальные взгляды на преподавание. Например, как-то он посоветовал своему аспиранту: «...надо меньше думать об основах. Главное, чем надо овладеть, — это техникой работы, а понимание тонкостей само придет потом».

Начиная с середины XX века наблюдается ярко выраженная тенденция к теоретизации курса общей физики, включение в него достаточно развитых модельных представлений, ранее

бота физиков-теоретиков встречала многочисленные трудности, то к 1950-м годам в соответствии с планом Сталина создать образцовые учебники по всем вопросам жизни и творчества Курс теоретической физики был «назначен» в качестве эталона учебника вообще.

** Определенная аналогия здесь имеется с преподаванием математики. В свое время Бурбаки предложили учить школьников теоретико-множественному языку математики. Однако спустя пять лет отказались от этого, а в СССР эти идеи были подхвачены колмогоровской школой и просуществовали более 15 лет. Еще совсем недавно наши школьники учили такое определение вектора [11]: «Вектором (параллельным переносом), определяемым парой (А, В) несовпадающих точек, называется преобразование пространства, при котором каждая точка М отображается на такую точку М1, что луч ММ1 сонаправлен с лучом АВ и расстояние ММ1 равно расстоянию |АВ|»



Л.Д. Ландау
1908–1968



Е.М. Лифшиц
1915–1985

характерных для курсов теоретической физики. Например, в то время стало модным начинать механику с основ теории относительности, электродинамику — с уравнений Максвелла, статистическую физику — с распределения Гиббса. А обычные вопросы общей физики — ньютоновскую механику, электро- и магнитостатику, идеальный газ — рассматривать как частные случаи общей теории. При этом объем общей физики уменьшался, она становилась все труднее для восприятия вчерашними школьниками. Тем не менее ситуация тогда еще не вышла из-под контроля, так как добротная «школьная» физика обеспечивала необходимый фундамент для освоения вузовской программы общей физики.

В настоящее время большинство «действующих» учебных пособий, в том числе выпущенных местными издательствами, можно было бы отнести к типу «словарей-справочников», где собраны известные формулы и определяются (не всегда корректно) основные понятия. Ни экспериментов, иллюстрирующих тот или иной закон, ни практических примеров физики вокруг нас в таких пособиях нет. С распространением системы ЕГЭ указанные недостатки будут только усугубляться.

И это при том, что основная мировая тенденция последних лет — создание больших интерактивных музеев занимательной науки, специальных физических лабораторий, куда на регулярной основе приезжают школьники и студенты со всего мира, чтобы прикоснуться к живой физике [6].

Сейчас положение дел с преподаванием физики в вузах становится критическим. Переход на ФГОС-3 сопровождается резким (на 30–50 %) уменьшением трудоемкости, в первую очередь за счет аудиторных занятий. Слабая школьная подготовка, основанная на формальных знаниях в формате ЕГЭ, требует введения в курс общей физики серьезного пропедевтического компонента. Наконец, отсутствие мотивации к получению знаний, падение престижа инженерно-технических профессий делают традиционные методики обучения малоэффективными.

Из положительных моментов, характеризующих современную образовательную систему, можно, пожалуй, отметить только появление интернета, обеспечивающего «шаговую доступность» любой информации, а также интерактивную связь учителя с учениками.

Эти и другие обстоятельства делают необходимым смену парадигмы преподавания физики в вузе. Прежде всего, следует провести ревизию содержания учебных программ. Например, совершенно неуместно включение в курс общей физики таких вопросов, как элементы аналитической механики (формализм Лагранжа, Гельмгольца), понятие векторного потенциала в электромагнетизме, весьма подробное изложение кристаллооптики. Этот список можно продолжать.

Без ущерба для курса можно перенести на факультативные занятия разговор о релятивистской физике, о квантовой теории вещества. В то же время большего к себе внимания требуют эмпирический компонент курса, тщательное и скру-

пулезное выполнение лабораторных работ физического практикума, насыщение лекционного курса демонстрациями физических эффектов.

Основным сейчас становится не объем фактов из разных областей физики, а логическое осмысление, оценка этих фактов, анализ взаимосвязей фундаментальных положений физики. Можно смело исключать из курса тот или иной раздел, тем более, что одно нажатие кнопки на компьютере — и вся необходимая информация высвечивается на мониторе. Поэтому главным на лекции, в лабораторном практикуме, на упражнениях становится рассуждение, обоснование, анализ эмпирической и теоретической информации, концептуальной базы физики в целом и отдельных ее разделов. И, конечно, возрастает роль лектора, который не просто сообщает студентам сумму знаний (это можно сделать и в дистанционной форме), но и эмоционально, методически готовит их к восприятию этих знаний как на лекции, так и во время самостоятельной работы.

Роль Научно-методического совета по физике в формировании нормативной базы учебных программ

Именно такой подход был принят Научно-методическим советом по физике Минобрнауки Российской Федерации, когда разрабатывалась примерная программа по дисциплине «Физика», согласованная с ФГОС-3 [12, 13]. Эта программа адресована как классическим университетам, так и инженерно-техническим, педагогическим, медицинским и сельскохозяйственным вузам. Все определяется трудоемкостью соответствующего

курса. Программа минимального уровня (8–10 зачетных единиц) предполагает способность студентов воспроизводить типовые ситуации, использовать их в решении простейших задач. На этом уровне рассматриваются только модельные представления, описывающие достаточно ограниченный круг экспериментальных ситуаций.

Базовый уровень программы рассчитан на 10–14 зачетных единиц и предполагает способность решения сложных задач, требующих знания всех разделов физики. Наконец, расширенный уровень (14–20 зачетных единиц) обеспечивает способность к построению и анализу развитой теоретической модели, фокусирующей внимание на отклонениях в поведении реальных прототипов от прогнозов простейшей теории.

В отличие от ФГОС-3, которые теперь определяют, какие компетенции формирует та или иная дисциплина, примерная программа по физике содержит инвариантное содержание модулей дисциплины с указанием дидактических единиц каждого раздела. В программе также приводится примерное содержание практических занятий и примерный список лабораторных работ физического практикума, а также основная и дополнительная литература для каждого уровня.

Примерная программа по физике, опубликованная в Бюллетене № 4 НМС по физике [12], была с воодушевлением принята научно-педагогической общественностью страны. В настоящее время эта программа — фактически единственный нормативный документ, определяющий содержание и методический уровень преподавания общей физики в российских вузах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лойцянский Л.Г. Из моих воспоминаний. Записки профессора-политехника. СПб.: Б. С. К., 1998. 139 с.
2. Хвольсон О.Д. Курс физики. Том первый. 5-е изд. Берлин: Государственное издательство РСФСР, 1923. 677 с.
3. Михельсон В.А. Физика. В двух томах. М.-Л.: ОНТИ НКПТ СССР, 1938. 335 с. (1 том), 368 с. (2 том).
4. Русаков В.П. Владимир Александрович Михельсон: научная и педагогическая деятельность // В сб.: Исследования по истории физики и механики. 2004. М.: Наука, 2005. С. 71–110.
5. Поль Р.В. Оптика и атомная физика. М.: Наука, 1966. 478 с.
6. Кожевников Н.М. Подходы к решению проблем в сфере образования и науки в Германии // Физическое образование в вузах. 2012. Т. 18, № 2. С. 30–39.
7. Кляус Е.М., Франкфурт У.И. Макс Планк. М.: Наука, 1980.
8. Низовцев В.В. Время и место физики XX века. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 208 с.
9. Сонин А.С. «Физический идеализм». История одной идеологической кампании. М.: Физматлит, 1994. 224 с.
10. Холл Карл. «Надо меньше думать об основах»: Курс теоретической физики Ландау и Лифшица в культурно-историческом контексте // В сб.: Ис-

следования по истории физики и механики. 2004. М.: Наука, 2005. С. 156–205.

11. **Клопский В.М., Скопец З.А., Ягодовский М.И.** Геометрия: Учеб. пособие для 9 и 10 классов средней школы. 6-е изд. М.: Просвещение, 1980. С. 42.

12. Бюллетень Научно-методического совета по физике. № 4. // Сост. Н.М. Кожевников. СПб.: Изд-во политехн. ун-та. 2012. 84 с.

13. www.fgosvpo.ru

REFERENCES

1. **Loytsyanskiy L.G.** Iz moikh vospominaniy. Zapiski professora-politekhnika. SPb.: B. S. K., 1998. 139 s. (rus.)

2. **Khvolson O.D.** Kurs fiziki. Tom pervyy. 5-ye izd. Berlin: Gosudarstvennoye izdatelstvo RSFSR, 1923. 677 s. (rus.)

3. **Mikhelson V.A.** Fizika. V dvukh tomakh. M.-L.: ONTI NKPT SSSR, 1938. 335 s. (1 tom), 368 s. (2 tom). (rus.)

4. **Rusakov V.P.** Vladimir Aleksandrovich Mikhelson: nauchnaya i pedagogicheskaya deyatelnost // *Vsb.: Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki*. 2004. М.: Nauka, 2005. S. 71–110. (rus.)

5. **Pol R.V.** Optika i atomnaya fizika. М.: Nauka, 1966. 478 s. (rus.)

6. **Kozhevnikov N.M.** Podkhody k resheniyu problem v sfere obrazovaniya i nauki v Germanii. *Fizicheskoye obrazovaniye v vuzakh*. 2012. Т. 18, № 2. S. 30–39. (rus.)

7. **Klyaus Ye.M., Frankfurt U.I.** Maks Plank. М.: Nauka, 1980. (rus.)

8. **Nizovtsev V.V.** Vremya i mesto fiziki XX veka. М.: Editorial URSS, 2000. 208 s. (rus.)

9. **Sonin A.S.** «Fizicheskiy idealizm». Istoriya odnoy ideologicheskoy kampanii. М.: Fizmatlit, 1994. 224 s. (rus.)

10. **Khol Karl.** «Nado menshe dumat ob osnovakh»: Kurs teoreticheskoy fiziki Landau i Lifshitsa v kulturno-istoricheskom kontekste // *Vsb.: Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki*. 2004. М.: Nauka, 2005. S. 156–205. (rus.)

11. **Klopskiy V.M., Skopets Z.A., Yagodovskiy M.I.** Geometriya: Ucheb. posobiye dlya 9 i 10 klassov sredney shkoly. 6-ye izd. М.: Prosveshcheniye, 1980. S. 42. (rus.)

12. *Byulleten Nauchno-metodicheskogo soveta po fizike*. 2012. № 4 / Sost. N.M. Kozhevnikov. SPb.: Izd-vo politekh. un-ta. 2012. 84 s. (rus.)

13. www.fgosvpo.ru (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КОЖЕВНИКОВ Николай Михайлович — доктор физико-математических наук профессор заместитель заведующего кафедрой экспериментальной физики института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, ученый секретарь Научно-методического совета по физике Министерства образования и науки РФ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nkozhev@mail.ru.

AUTHOR

KOZHEVNIKOV Nikolay M. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nkozhev@mail.ru

УДК 001.8

А.В. Бабкин

СОТРУДНИКИ СПБГПУ — РУКОВОДИТЕЛИ НАУЧНЫХ И НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ ШКОЛ

A.V. Babkin

EMPLOYEES OF SPBSPU — LEADERS OF SCIENTIFIC AND SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL SCHOOLS

Представлены научные и научно-педагогические школы федерального и регионального уровней, руководителями которых являются сотрудники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

НАУКА; НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ; НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ШКОЛЫ; КОНКУРС; РЕЕСТР НАУЧНЫХ ШКОЛ.

Are presented scientific and scientific and pedagogical schools federal and regional level, the heads which are members of Saint-Petersburg State Polytechnic University.

SCIENCE; SCIENTIFIC SCHOOLS; SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL SCHOOLS; COMPETITION; REGISTER OF SCIENTIFIC SCHOOLS.

Ежегодно Министерство образования и науки Российской Федерации проводит конкурс на право получения грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих российских научных школ. Выделение грантов осуществляется в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 27 апреля 2005 г. № 260 «О мерах по государственной поддержке молодых российских ученых — кандидатов наук и докторов наук и ведущих научных школ Российской Федерации».

Ведущей научной школой в РФ считается сложившийся коллектив исследователей различных возрастных групп и научной квалификации, связанных проведением исследований по общему научному направлению и объединенных совместной научной деятельностью. Указанный коллектив должен осуществлять подготовку научных кадров, иметь в своем составе руководителя, а также молодых исследователей.

По итогам конкурса руководителями ведущих научных школ признаны три сотрудника Санкт-Петербургского государственного политехнического университета:

Васильев Юрий Сергеевич (инженерно-строительный институт), тема — «Исследования и обоснование параметров, режимов работы и методов управления энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии для распределенной и децентрализованной генерации, работающей в условиях Крайнего Севера»;

Лопота Виталий Александрович (институт металлургии, машиностроения и транспорта), тема — «Исследование и моделирование процессов формирования шва при сварке разнородных материалов концентрированными потоками энергии»;

Рудской Андрей Иванович (институт металлургии, машиностроения и транспорта), тема — «Новые дисперсно-упрочненные функциональные материалы на основе меди и алюминия».

В соответствии с распоряжением Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга от 19.11.2012 № 80 «Об утверждении Положения о реестре ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга» и решением Президиума Научно-технического совета при Правительстве нашего города (протокол № 2/13 от 09.12.2013) в целях сохранения и эффективного использования научно-техническо-

го и образовательного потенциала Санкт-Петербурга распоряжением Комитета от 13.12.2013 № 99 утвержден список научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга, включенных в названный реестр.

В него включены шестнадцать сотрудников Политехнического университета — руководителей ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга (см. табл.).

| № | ФИО | Научная область деятельности школы | Институт СПбГПУ |
|----|-------------------------------|---|---|
| 1 | Акопова Мария Алексеевна | Теория и методика профессионального образования | Институт прикладной лингвистики |
| 2 | Бурлов Вячеслав Георгиевич | Системная интеграция процессов государственного управления | Инженерно-экономический институт |
| 3 | Васильев Юрий Сергеевич | Нетрадиционная энергетика | Инженерно-строительный институт |
| 4 | Вахрушев Сергей Борисович | Физика нанокompозитных материалов | Институт физики, нанотехнологии и телекоммуникаций |
| 5 | Воробьев Леонид Евгеньевич | Физика полупроводниковых наноструктур, оптоэлектроника | Институт физики, нанотехнологии и телекоммуникаций |
| 6 | Глухов Владимир Викторович | Экономика и управление инновационными процессами | Инженерно-экономический институт |
| 7 | Гуменюк Василий Иванович | Проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях (защита в чрезвычайных ситуациях) | Институт военно-технического образования и безопасности |
| 8 | Зегжда Пётр Дмитриевич | Теория и практика создания безопасных компьютерных систем | Институт информационных технологий и управления |
| 9 | Котляров Всеволод Павлович | Программная инженерия | Институт информационных технологий и управления |
| 10 | Лопота Виталий Александрович | Лазерные технологии обработки материалов | Институт металлургии, машиностроения и транспорта |
| 11 | Рудской Андрей Иванович | Создание и совершенствование технологий пластической и термомеханической обработки материалов | Институт металлургии, машиностроения и транспорта |
| 12 | Сильников Михаил Владимирович | Механика горения и взрыва и экстремальные процессы в материалах | Институт военно-технического образования и безопасности |
| 13 | Трифонов Петр Владимирович | Помехоустойчивое кодирование и его приложения | Институт информационных технологий и управления |
| 14 | Федоров Михаил Петрович | Научные основы энергосберегающих и природоохранных технологий в городском строительстве и хозяйстве | Инженерно-строительный институт |
| 15 | Цикин Игорь Анатольевич | Цифровая обработка сигналов в радиотехнических системах связи и навигации | Институт физики, нанотехнологии и телекоммуникаций |
| 16 | Шнеерсон Герман Абрамович | Мощная импульсная энергетика, техника и физика сверхсильных импульсных магнитных полей | Институт энергетики и транспортных систем |

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БАБКИН Александр Васильевич — директор Департамента научных исследований СПбГПУ, профессор кафедры экономики и менеджмента в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор экономических наук; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: al-vas@mail.ru

AUTHOR

BABKIN Aleksandr V. — St. Petersburg State Polytechnic University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: al-vas@mail.ru

УДК 001:92

Ф.П. Кесаманлы

**УЧЕНЫЕ-ПОЛИТЕХНИКИ, ПРОСЛАВИВШИЕ НАШУ СТРАНУ.
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ АН СССР ЯКОВ ИЛЬИЧ ФРЕНКЕЛЬ
(К 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)**

F.P. Kesamanly

**SCIENTISTS-POLYTECHNICS, GLORIFIED OUR COUNTRY.
CORRESPONDING MEMBER OF THE AS USSR YAKOV FRENKEL
(THE 120TH ANNIVERSARY OF HIS BIRTH)**

Яков Ильич Френкель (1894–1952) — выдающийся советский физик-теоретик, член-корреспондент АН СССР (1929), ближайший соратник академика А.Ф. Иоффе, лауреат Сталинской премии (1947). Окончил Императорский Петроградский университет в 1916 году. В 1918–1920 годах занимал должность приват-доцента в Таврическом университете. С 1921 года и до самой смерти в январе 1952 года работал одновременно в Физико-техническом институте АН СССР (старший физик, руководитель работ, заведующим отделом теоретической физики) и преподавал на физико-механическом факультете Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина (с 1926 года профессор теоретической физики, а с 1931 года заведующий кафедрой теоретической физики).

ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ АН СССР; ФРЕНКЕЛЬ; ФИЗИК-ТЕОРЕТИК; ЛАУРЕАТ СТАЛИНСКОЙ ПРЕМИИ.

Jacob Frenkel (1894–1952) — a prominent Soviet physicist, member of the Academy of Sciences of the USSR (1929), the closest ally of Academician AF Joffe, winner of the Stalin Prize (1947). He graduated from the Imperial University of Petrograd in 1916. In 1918–1920, he served as a privat-docent at the Tauride univrsitete. From 1921 until his death in January 1952 while working at the Physical — Technical Institute of the USSR Academy of Sciences (senior physicist and head of operations, head of the Department of Theoretical Physics), and taught at the Faculty of Physics and Mechanics of the Leningrad Polytechnic Institute M.I. Kalinin (since 1926 Professor of Theoretical Physics, and since 1931 head of the department of theoretical physics).

CORRESPONDING MEMBER OF THE ACADEMY OF SCIENCES USSR; FRENKEL; THEORETICAL PHYSICIST; STALIN PRIZE WINNER.

«Яков Ильич Френкель принадлежит к числу самых крупных физиков-теоретиков нашего времени. Его работы охватывают все области физики и распространяются на геофизику, астрономию, химию, физикохимию и ряд областей техники.»

Академик А.Ф. Иоффе

Грядущий 2014 год — юбилейный для четырех выдающихся ученых физико-механического факультета СПбГПУ: исполняется 120 лет со дня рождения героя нашего очерка Я.И. Френкелю, академикам Ивану Васильевичу Обреимову

(8 марта), Петру Леонидовичу Капице (9 июля), Петру Ивановичу Лукирскому (13 декабря). О всех троих академиков автор этих строк в 2002 и 2009 годах публиковал в «Научно-технических ведомостях СПбГПУ» историко-биографические очерки.

Пришла пора и для очерка о Я.И. Френкеле. Он родился 29 января (10 февраля) 1894 года в Ростове-на-Дону в семье Ильи Абрамовича Френкеля (1864–1938) и Розалии Абрамовны, урожденной Баткиной, (1872–1944) и был старшим сыном.

Илья Абрамович в молодости принимал участие в народовольческом движении. Эта его деятельность послужила причиной ареста и ссылки в Сибирь, в город Березов, где он провел около семи лет. Вернувшись на родину в 1892 году, он женился на Розалии Абрамовне. В их семье было пятеро детей, из которых до двадцатых годов дожили только двое — Яков Ильич и Владимир Ильич (1896–1962). Семья довольно часто переезжала с места на место. Сначала жила в Азове, затем в Луганске, Казани, Минске, с 1909 года в Петербурге—Петрограде.

В детстве Яков проявлял способности к музыке и живописи. Это побудило родителей организовать его обучение игре на скрипке (начиная с 8 летнего возраста) и рисованию (с 12 летнего возраста). Оба эти занятия остались излюбленными для Якова Ильича вплоть до самой смерти. С 14-летнего возраста Яков начал увлеченно заниматься физикой и математикой. Это увлечение оказалось более прочным, и он сосредоточил свои интересы на науке. Поэтому, окончив в 1913 году частную гимназию К.И. Мая с золотой медалью, он поступил на физико-математический факультет Императорского Санкт-Петербургского университета. Университет Яков Ильич окончил за три года вместо четырех, осенью 1916 года, и был оставлен при нем для подготовки к профессорскому званию.

Этой же осенью профессор А.Ф. Иоффе на базе физической лаборатории Петроградского политехнического института имени Петра Великого организовал семинар по новой физике и привлек к участию в нем нескольких молодых людей, интересовавшихся новейшим развитием физики и желавших работать в этой области. Это были И.К. Бобр, Н.И. Добронравов, Я.Г. Дорфман, П.Л. Капица, М.В. Кирпичев, П.И. Лукирский, К.Ф. Нестурх, Н.Н. Семенов, Я.Р. Шмидт, А.П. Ющенко. В их числе был и Я.И. Френкель. Выбор обсуждавшегося материала определяли интересы А.Ф. Иоффе, а его стимулирующие дискуссии оказали глубокое влияние на всех молодых участников семинара, в том числе и на



Яков Ильич Френкель.

Я.И. Френкеля. Результатом этого влияния на Якова Ильича стала его первая серьезная работа — «Об электрическом двойном слое на поверхности жидких и твердых тел», в которой он впервые развил теорию контактных потенциалов и поверхностного натяжения металлов. Эта работа на английском языке была опубликована в апреле 1917 года в «Philosophical Magazine», 1917, Т. 33, № 196, р. 297–322, на русском языке — в ЖРФХО (Сер. Ч. физ., 1917. 49, вып. 3/9. С. 100–118) и там же в 1919 году (1919. Т. 50, вып. 7/9. С. 238–267).

В мае 1917 года вместе с родителями и братьями Яков Ильич переехал в Ялту. Осенью того же года приехал в Петроград. В течение недели



Розалия Ильинична и Илья Абрамович — родители Френкеля



Я.И. Френкель — студент
Императорского Санкт-
Петербургского университета

сдал четыре магистерских экзамена и в декабре вернулся в Крым. Здесь Яков Ильич принимал участие в организации Таврического университета в Симферополе, где с мая 1918 года (во время немецкой оккупации) читал в качестве приват-доцента лекции по физике сначала для медиков и агрономов, затем для математиков и естественников и, наконец, в последнее время для тех и других. Кроме того, читал весной краткий курс математики для естественников и осенью 1920 года — курс электродинамики (общей механики электричества) для студентов-математиков 5-го семестра, а также вел беседы с преподавателями о строении атомов, статистической механике, теории относительности, теории квантов и других вопросах теоретической физики.

Весной 1919 года, после восстановления Советской власти в Крыму, работал в Наркомпросе Крыма в качестве члена коллегии и заведующего отделением внешкольного образования. После возвращения «белых» (в августе 1919 года) был арестован, но после двухмесячного пребывания в тюрьме освобожден и удален из университета. Был восстановлен в нем лишь через несколько месяцев, когда началось наступление советских войск на Крым. После ликвидации белогвардейщины осенью 1920 года вновь вернулся в Наркомпрос Крыма.

В конце 1920 — начале 1921 года в жизни Я.И. Френкеля произошли два важных события.

Первое: в конце декабря 1920 года он женился на девятнадцатилетней студентке биологического факультета С.И. Гординой (1901—1960). Сарра Исааковна свободно владела английским, французским и немецким языками и занималась научно-техническими переводами с русского и на русский, работала на договорных началах в физических журналах. В ее лице Яков Ильич нашел верного друга и помощника на всю жизнь. Она помогала мужу на работе — перепечатывала и, если нужно было, переводила его статьи. А, самое главное, Сарра Исааковна родила двоих сыновей: Сергея (1923—?) и Виктора (1930—1997), которые окончили физико-механический факультет Ленинградского политехнического института и стали докторами физико-математических наук, профессорами Большой дружки Френкелей академик И.Е. Тамм писал о ней: «Очень умная, чуткая и отзывчивая женщина, Сарра Исааковна сыграла большую и благотворную роль в жизни Якова Ильича» [2, с. 406].

Второе: В период с 1918 по конец 1920 года Яков Ильич не имел возможности заниматься исследованиями в области теоретической физики. Желая возобновить научную деятельность в области теоретической физики, он добился того, что был откомандирован в Москву в распоряжение Главпрофобра, а там его откомандировали в Петроград, где с февраля 1921 года начал работать старшим физиком в Государственном рентгенологическом и радиологическом институте и одновременно преподавать теоретическую физику на физико-механическом факультете Первого петроградского политехнического института.

В Петрограде Яков Ильич быстро осваивается и с головой уходит в работу. Менее чем за пять лет пишет и издает пять книг. В 1922—1924 годах вышла книга «Строение материи» в трех частях. В предисловии к ней А.Ф. Иоффе писал: «Книга Френкеля представляет ценный вклад не только в общую физическую литературу. Нигде еще вся современная литература вопроса о строении материи не подвергалась с такой полнотой теоретическому анализу». В 1923 году выходит его книга «Теория относительности», написанная на основе лекций, прочитанных им в летнем семестре

1922 года на физико-механическом факультете Политехнического института. Книга представляет собой первое на русском языке «непопулярное руководство» в этой области. В 1924 году он издает монографию «Электронная теория твердых тел», написанную по предложению А.Ф. Иоффе. В книге нашли отражение отдельные его представления о тепловом движении, легшие в основу его более поздних оригинальных работ. В течение 1925 года вышли в свет сразу две книги Якова Ильича: «Электричество и материя», представляющая собой популярную переработку «Строения материи», и «Курс векторного и тензорного анализа с приложениями к механике», написанный на основе читаемых лекций.

Параллельно с изданием книг Яков Ильич в «ЖРФХО», «Zeitschrift für Physik» и «Nature» опубликовал в 1924–1925 годах 13 оригинальных работ по теории электропроводности металлов, по теории явлений конденсации и адсорбции, по электронной теории твердых тел, которые выдвинули его в число ведущих физиков Советского Союза и сделали его имя известным далеко за пределами нашей страны.

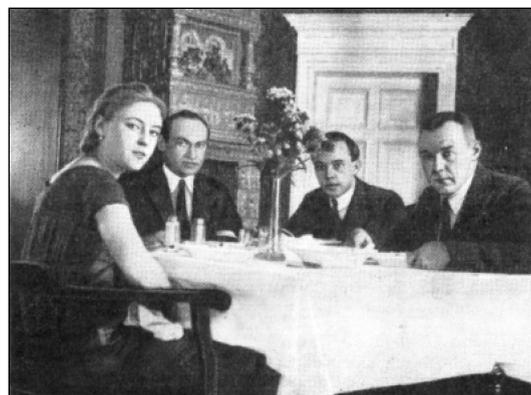
В сентябре 1924 года Яков Ильич выступил с пятью докладами на съезде физиков в Ленинграде. На этом съезде присутствовал П.С. Эренфест, высоко оценивший его работы.

В 1925 году по представлению П.С. Эренфеста он получает стипендию Рокфеллеровского фонда, выдававшуюся наиболее способным молодым ученым, и в ноябре уезжает в годичную командировку за границу: в Германию, Францию и Англию. Вместе с ним едут жена и сын Сергей, поселившиеся в Ницце, куда Яков Ильич наезжает из Гамбурга и Геттингена, где он постоянно трудится во время командировки. В Берлине он 20 ноября встречался с А. Эйнштейном у него на квартире и имел с ним двухчасовую беседу, а 24 ноября присутствовал на берлинском коллоквиуме, в работе которого участвовали А. Эйнштейн, М. Планк, В. Нернст, М. Лауэ и другие крупнейшие физики. 30 ноября договорился со Шпрингером об издании первого тома «Электродинамики», а 1 декабря поехал в Гамбург, где до конца марта 1926 года работал в университете у профессора В. Паули. В апреле Я.И. Френкель посетил Париж, где встречался с П. Ланжевеном и с М. Кюри.

С конца апреля по октябрь 1926 года он работал в Геттингенском университете у профессора М. Борна.

В августе он посетил Оксфорд и Кембридж. В конце октября Яков Ильич и его семья вернулись в Ленинград. За время пребывания за границей он успел завершить работу над первым томом «Электродинамики», который вышел из печати в 1926 году на немецком языке. В сентябре 1927 года Яков Ильич участвовал в работе Международного конгресса физиков, посвященного 100-летию со дня рождения А. Вольты, который проходил в городе Комо — родине А. Вольты. Конгресс получился очень представительным. Его делегатами были Хендрик Лоренц, Эрнест Резерфорд, Макс Планк, Нильс Бор — их имена стали легендарными. Из Германии приехали М. Борн, В. Гейзенберг, А. Зоммерфельд, М. Лауэ, В. Паули, Джеймс Франк и О. Штерн, из Америки — Р. Милликен, А. Комптон, И. Ленгмюр и Р. Вуд, из Англии — Ф. Астон, Г. Брэгг, А. Эддингтон. Итальянскую физику представляли — Э. Ферми, К. Майорана, Т. Леви-Чивита, делегатом конгресса был П. Дебай (Цюрих, Швейцария). Из 70 делегатов конгресса 13 были нобелевскими лауреатами, а 7 из перечисленных ученых получили эту премию в последующие годы. Как делегат конгресса Яков Ильич получил возможность путешествовать по Италии и воспользовался ею. В Комо Яков Ильич познакомился и беседовал с Х. Лоренцем и И. Ленгмюром по интересовавшим обоих ученых вопросам.

Но самым интересным для него было знакомство с А. Зоммерфельдом, который оказался его спутником по путешествию.



Е.И. Кондратьева, Я.И. Френкель,
В.Н. Кондратьев, В.Р. Бурсиан: Геттинген,
1926 г.



Я.И. Френкель и Х. Лоренц. Кома 1927 г.

Вернулся он из Италии в первой половине ноября 1927 года и приступил к своей обычной деятельности: научной работе, руководству аспирантами и теоретическим семинаром в Физико-техническом институте и чтению лекций в Политехническом.

В 1927–1929 годах он публикует более 20 работ, в основном посвященных теории металлов. Одновременно он завершает работу над вторым томом «Электродинамики» и издает «Введение в волновую механику» — одно из первых учебных пособий, посвященных этой недавно возникшей науке. Обе книги увидели впервые свет в Германии на немецком языке в 1928 и 1929 годах.

В начале 1929 года число работ Якова Ильича, опубликованных у нас в стране и за границей достигло 60. Они выдвинули его в ряды ведущих теоретиков мира. В январе 1929 года состоялось очередное общее собрание Академии наук СССР, во время прохождения которого сразу одиннадцать (4 бывших, их фамилии ниже выделены курсивом, и 7 действующих) преподавателей Ленинградского политехнического института были избраны в ее члены.

12 января академиками были избраны: 1) Виноградов Иван Матвеевич (1891–1983) по Отделению физико-математических наук (математика); 2) *Зелинский* Николай Дмитриевич (1861–1953) по тому же Отделению (органическая химия); 3) Кистяковский Владимир Александрович (1865–1952) по тому же Отделению (физическая химия); 4) Миткевич Владимир Федорович (1872–1951) по тому же Отделению (электротехника); 5) *Петрушевский* Дмитрий Моисеевич (1863–1942) по Отделению гумани-

тарных наук (история); 6) *Солнцев* Сергей Иванович (1872–1936) по тому же Отделению (политическая экономия и статистика).

31 января членами-корреспондентами были избраны: 1) *Капица* Петр Леонидович (1894–1984) по разряду физическому Отделения физико-математических наук (физика); 2) Кирпичев Михаил Викторович (1879–1955) по разряду техническому того же Отделения (теплотехника); 3) Семёнов Николай Николаевич (1896–1986) по физическому разряду того же Отделения (физика); 4) Френкель Яков Ильич (1894–1952) по физическому разряду того же Отделения (физика); 5) Чернышев Александр Алексеевич (1882–1940) по разряду техническому того же Отделения (электротехника). Кандидатуры П.Л. Капицы, Н.Н. Семенова и Я.И. Френкеля для избрания в члены АН СССР представляли академики А.Ф. Иоффе, П.П. Лазарев, Д.С. Рождественский, Л.И. Мандельштам, В.Ф. Миткевич.

В середине сентября 1930 года Яков Ильич уезжает в годичную командировку в США в качестве так называемого «гостевого профессора» Миннеаполисского университета в Миннесоте и 1930/31 учебный год проводит в Америке. Здесь ему неоднократно приходилось выступать не только с научными докладами и лекциями, но и с сообщениями о Советском Союзе. В них он рассеивал нелепые бредни, которыми реакционные круги США в то время пытались отравить симпатии американского народа к первому социалистическому государству и советскому народу. «Я с гордостью несу свое знамя советского гражданина», — писал Яков Ильич родным. Находясь в Америке, он написал и опубликовал пять статей в журнале «Physical Review», в которых ввел понятия «дырка» и «экситон», и подготовил первый том «Волновой механики» на английском языке, изданный в 1932 году в Оксфорде, а в 1933-м — в Ленинграде на русском языке. Второй том «Волновой механики» Яков Ильич написал уже по возвращении на родину. В 1934 году эта книга вышла на русском языке в Ленинграде и на английском в Оксфорде.

С 1933 по 1941 год он опубликовал 85 оригинальных статей и издал 5 новых книг.

22 июня 1941 года началась Великая Отечественная война. Уже в августе Ленинградский физико-технический институт эвакуируется в Казань. Здесь Яков Ильич наряду с работой



Теоретический семинар Я.И. Френкеля в Физико-техническом институте. Слева направо: Л.Э. Гуревич, Л.Д. Ландау, Л.В. Розенкевич, А.Н. Арсеньева, Я.И. Френкель, Г.А. Гамов, М.В. Мачинский, Д.Д. Иваненко, Г.А. Мандель

в ФТИ с 1942 по 1945 годы (до реэвакуации) заведует кафедрой теоретической физики Казанского университета. Одновременно он консультирует работы оборонного характера. В конце 1942 года он начал работать над книгой «Кинетическая теория жидкостей» [7, 11], которая была издана в 1945 году в Москве, а через год она вышла в Оксфорде в переводе на английский язык.

В 1947 году за работы по теории жидкого состояния, обобщенные в монографии «Кинетическая теория жидкостей», Я.И. Френкелю была присуждена Сталинская премия первой степени. У этой монографии судьба была счастливой: она выходила трижды в СССР (1945, 1959, 1975), в Англии (1961), дважды в США (1955, 1968), в ФРГ (1957).

С 1944 по 1946 годы Яков Ильич принимает участие в работах Института теоретической геофизики (Москва), а с 1945 по 1951 годы — в работах Главной геофизической обсерватории (Ленинград) и является научным руководителем лаборатории ВНИИ авиационных материалов (Москва).

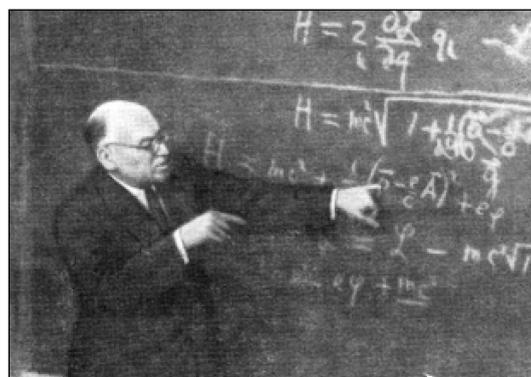
В 1946 году группа преподавателей металлургического факультета ЛПИ обратилась к Якову Ильичу с просьбой прочесть для преподавательского состава факультета курс лекций по физике металлов.

Такой курс был им прочитан, и на его основе в 1948 году вышла книга «Введение в теорию ме-

таллов» [8]. Впоследствии она переиздавалась еще три раза (1950, 1958, 1972), была издана на венгерском языке в Будапеште (1951), румынском языке в Бухаресте (1953), польском языке в Варшаве (1955) и китайском языке в Пекине (1958).

В конце сороковых годов у Якова Ильича возникла гипертоническая болезнь и стала быстро прогрессировать.

Умер Я.И. Френкель 23 января 1952 года на 58 году жизни. Прошли годы, почти нет учебника и монографии, где не упоминалось бы имя Якова Ильича: «дефекты по Френкелю», «экситоны Френкеля», «капельная модель ядра Бора — Уилера — Френкеля». Он жив в своих трудах [9–11] — классик физики.



Я.И. Френкель на лекции в Политехническом институте. Ленинград, 1949 г.

Байки О Я.И. Френкеле

Яков Ильич был человеком очень общительным, веселым и обожал смеяться. Любил анекдоты, которые записывал в специальную книжечку. Иногда в компании рассказывал анекдотические истории, происходившие с ним [5, с. 190]. Здесь мы воспроизводим некоторые байки о нем, приведенные в мемуарной литературе.

Ученый-романтик

Оствальд подчеркивает, что одной из черт ученых-романтиков является скорость умственных решений. В этом плане Яков Ильич может служить примером ученого романтического склада. Он мгновенно умел схватывать сущность явлений и тут же давал им толкование. Эта особенность Якова Ильича запечатлена в шуточной истории, которую о нем рассказывали в ФТИ в 30-е годы. Его изловил в коридоре некий экспериментатор и, рассказав о своих опытах и нарисовав на листочке бумаги соответствующую кривую, показал Якову Ильичу. Френкель, минутку подумав, дал объяснение ходу кривой. Выяснилось, однако, что он смотрел на кривую вверх ногами и что она не падающая, как полагал Яков Ильич, а напротив, возрастающая. Тогда, поразмыслив еще немного, он объяснил и это поведение кривой [3, с.400].

Четыре выигрыша подряд в Монте-Карло

В своих воспоминаниях лауреат Нобелевской премии по химии за 1956 год Н.Н. Семёнов пишет о совместных в 1926 году с Яковым Ильичом восхождении на Монблан в Шамони, на стыке границ Франции, Италии и Швейцарии, купании на пляже в Ницце и визите в Монте-Карло. В Монте-Карло они решили попытать счастья в игре, выделили какую-то сумму и четыре раза подряд поставили на «красное». Вопреки предсказаниям теории вероятностей, все четыре раза выигрыш падал на «rouge». «Заработанную» сумму решили тут же истратить в шикарном ресторане, куда Николая Николаевича и Якова Ильича, однако, не пустили, так как на них не было галстуков: они были одеты по-весеннему, в рубашках с отложными воротниками. Пришлось удовлетвориться более скромным рестораном [5, с. 25].

Импровизация на лекции

Многое из того, что говорил Якова Ильич на лекции, принадлежало ему самому, а некоторые выкладки впервые производились на лекции. Он обладал поразительной способностью импровизации. Доходило до анекдотов. Однажды один доцент обратился с каким-то вопросом к Якову Ильичу, проходившему через парк ЛПИ. «Подождите, — ответил он, — у меня пять минут назад началась лекция, а я еще не знаю, что буду читать [5, с. 231].

Чучело на лекции

Специальные курсы Якова Ильича на физмехе слушали совсем небольшие группы студентов. В одну из них входили Г.И. Аксенов, А.Ф. Вальтер, В.Н. Кондратьев, Н.Н. Миролюбов и Ю.Б. Харитон. Столь малочисленная аудитория способствовала установлению равных, дружеских отношений между студентами и лектором, тем более что Яков Ильич был ненамного старше своих слушателей. А отсюда, по воспоминаниям Н.Н. Миролюбова, неповторимая атмосфера, царившая на этих лекциях (недаром Миролюбов, Кондратьев и Харитон стали в дальнейшем друзьями Френкеля). Бывало, что над Яковом Ильичем подшучивали. Так, однажды, придя на лекцию, Яков Ильич увидел, что число его слушателей подскочило на 20 % — в аудитории сидел еще один студент. «Итак, вас теперь шестеро», — сказал он и принялся читать лекцию. Только час спустя, когда студенты специально обратили его внимание на новичка, Яков Ильич ко всеобщему удовольствию и своему собственному удивлению обнаружил, что это было чучело студента, которое смастерил В.Н. Кондратьев из своего пальто и шапки! Нужно при этом удивляться не тому, что «новый» студент сидел в пальто и шапке и что это не вызвало удивления лектора, а тому, что В.Н. Кондратьев целый час просидел без пальто в холодной аудитории! [3, с. 126,127].

Физики браконьеры

Зима 1921/22 года была очень холодная, водопровод не действовал, дров не было. Я.Г. Дорфман вспоминает это время: «Ночь. В Сосновке нет фонарей. Трамваи не ходят. На Приютской улице, на том самом месте, где стоит бывший опытный завод ЛФТИ, был сосновый лес. Среди высоких стволов крадутся три тени. Впереди служитель одной из лабораторий Политехнического института с топором, позади двое с пилой: профессор Яков Ильич Френкель да я. Идем, озираемся по сторонам. Тишина... Вдали кто-то пилит дерево. Мы приступаем к работе. После больших наших усилий падает сосна. Никто, к счастью, не видит нас. С трудом превеликим пилим ствол на части, тащим на себе трофеи... Осталось донести последнее полено. Чу! Навстречу нам какие-то люди. Мы поспешно бросаем полено и удаляемся восвояси. А люди почему-то сворачивают в противоположную сторону. Мы не рискуем вернуться за поленом, а в душе проклиная этих праздношатающихся... На другой день узнаем, что это были студенты, среди них мой однокурсник — Виктор Николаевич Кондратьев. Они оказываются, переполошились, встретив нас, ведь они тоже занимались незаконной охотой за дровами» [3, с. 127,128].

Привычка опаздывать

Точность не была добродетелью Я.И. Френкеля. Он всегда опаздывал: на поезд, на семинар, на лекцию. Яков Ильич в этом отношении бывал объектом добродушных подшучиваний: «Френкель сегодня во время опоздал», «Яков Ильич опаздывает не на много, но всегда». Абрам Федорович Иоффе в таких случаях, дождавшись Якова Ильича, говорил: «Ну вот, Яков Ильич пришел — можно и семинар начинать». Удивительную терпимость проявляли в этих случаях студенты: лекции Якова Ильича никогда не срывались, несмотря на опоздания лектора.

Однажды о таком опоздании сообщили директору Политехнического института (было это в году 1949–1950-м), который потребовал от профессора Френкеля объяснить в письменном виде причину опоздания на лекцию. Якова Ильич представил объяснительную записку следующего содержания: «В ответ на Ваш запрос сообщаю, что на свою лекцию не опаздывал, так как, когда я пришел, она еще не началась» [2, с. 421].

Микро Леонардо да Винчи

Интенсивно работая во всех областях теоретической физики, Яков Ильич преуспевал также в искус-

стве — он играл на скрипке и писал масляными красками картины, главным образом портреты. По поводу его универсальности было замечено: «Да Вы просто Леонардо да Винчи», на что Яков Ильич со свойственной ему скромностью и находчивостью ментально ответил: «Микро» [5, с. 232].

Полет в Москву с аэродрома «Сосновка»

Яков Ильич никогда не замыкался в тесном кругу физиков. Он с удивительной легкостью умел устанавливать научные, деловые, дружеские контакты с самыми различными людьми... В первые послевоенные годы в парке Сосновка в Лесном существовал аэродром. Яков Ильич, любивший гулять в этом парке со своей любимой собакой — спанием Амиком, рассказывал: «Я проходил мимо аэродрома и познакомился с тамошним начальником». Увидев вопросительные взгляды, продолжал: «Во-первых, это приятные люди, во-вторых, они обещали мне содействие, если нужно будет срочно лететь в Москву». И, действительно, вскоре Яков Ильич «слетал» в Москву непосредственно с этого аэродрома [5, с. 234].

В заключение автор благодарит доцента В.Б. Ступака и инженера О.А. Матенёва за помощь оказанную при подготовке рукописи настоящего очерка к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ансельм А.И. Яков Ильич Френкель // Успехи физических наук. 1952. Т. 47, вып. 3. С. 470–476.
2. Успехи физических наук. 1962, Т. 76, вып. 3. (Весь выпуск посвящен Я.И. Френкелю).
3. Френкель В.Я. Яков Ильич Френкель. М.—Л.: Наука, 1966. 474 с.
4. Френкель Яков Ильич // Физики о себе. Л.: Наука, 1990. С. 93–102.
5. Я.И. Френкель. Воспоминания, письма, документы. Л.: Наука, 1986. 491 с.
6. Яков Ильич Френкель: Материалы к биобиблио-

графии. М.: Наука, 1984. 91 с.

7. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 592 с.
8. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. Изд. 4. Л.: Наука, 1972. 424 с.
9. Френкель Я.И. Собрание избранных трудов. Т. 1. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 370 с.
10. Френкель Я.И. Собрание избранных трудов. Т. 2. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1958.—600 с.
11. Френкель Я.И. Собрание избранных трудов. Т. 32 — М.—Л.: АН СССР, 1959. 460 с.

REFERENCES

1. Ansel'm A.I. Iakov Il'ich Frenkel'. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1952. T. 47, vyp. 3. S. 470–476. (rus.)
2. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1962. T. 76, vyp. 3 (Ves' vypusk posviashchen Ia.I. Frenkel'iu).
3. Frenkel' V.Ia. Iakov Il'ich Frenkel'. M.—L.: Nauka, 1966. 474 s. (rus.)
4. Frenkel' Iakov Il'ich / V kn.: Fiziki o sebe. L.: Nauka, 1990. S. 93–102. (rus.)
5. Frenkel' Ya.I. Vospominaniia, pis'ma, dokumenty. L.: Nauka, 1986. 491 s. (rus.)
6. Iakov Il'ich Frenkel': Materialy k biobibliografii.

M.: Nauka, 1984. 91 s. (rus.)

7. Frenkel' Ya.I. Kineticheskaia teoriia zhidkostey. L.: Nauka, 1975. 592 s. (rus.)
8. Frenkel' Ya.I. Vvedenie v teoriu metallov. Izd. 4. L.: Nauka, 1972. 424 s. (rus.)
9. Frenkel' Ya.I. Sobranie izbrannykh trudov. T. 1. M.—L.: Izd-vo AN SSSR, 1956. 370 s. (rus.)
10. Frenkel' Ya.I. Sobranie izbrannykh trudov. T. 2. M.—L.: Izd-vo AN SSSR, 1958.—600 s. (rus.)
11. Frenkel' Ya.I. Sobranie izbrannykh trudov. T. 32. M.—L.: Izd-vo AN SSSR, 1959. 460 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КЕСАМАНЛЫ Фагам Паша-оглы — доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: fagam19@mail.ru

AUTHOR

KESAMANLY Fagam P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: fagam19@mail.ru

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием:

— зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006г.) и распространяется по подписке агентства «Роспечать» (индекс 18390);

— имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 1994-2354);

— внесен Высшей аттестационной комиссией Минобразования РФ в Перечень периодических научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, ученой степени кандидата наук;

— с 2009 г. входит в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)»;

— сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНТИ РАН, а также в международную систему по периодическим изданиям “Ulrich’s Periodicals Directory”.

Журнал публикует результаты работ в следующих областях науки и техники: энергетика, электротехника, материаловедение, металлургия, машиностроение.

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

Публикация материалов, в том числе соискателей ученых степеней, осуществляется бесплатно.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Представление материалов

В статье должны быть кратко изложены новые и оригинальные результаты исследований, полученные авторами; следует избегать повторов, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов, формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

При написании оригинальной научной статьи и оформлении рукописи авторы должны придерживаться следующих правил. Статья должна представлять собой описание выполненных исследований с указанием их места в соответствующей области наук и обсуждением значения выполненной работы. Рукопись должна содержать достаточное количество информации и ссылок на общедоступные источники для того, чтобы работа могла быть повторена независимо от авторов.

Название статьи должно быть кратким, но информативным. Обращаем Ваше внимание на то, что журнал издается как на русском, так и на английском языке. В связи с этим, не следует использовать аббревиатуру в названии статьи.

Аннотация должна давать читателю сжатую информацию о содержании статьи. Аннотация должна быть информативной и отражать не только основные цели статьи, но и главные результаты и выводы работы. Аннотация не является частью текста и сама по себе должна являться законченным описанием.

Ключевые слова должны отражать основную проблематику статьи и должны приводиться на русском языке для русской и на английском для англоязычной версии статьи. Количество ключевых слов – не менее трех и не более семи.

Адрес для корреспонденции должен содержать фамилию автора для корреспонденции (не обязательно первого автора), его полный почтовый адрес, телефон, факс, e-mail.

При необходимости Редколлегия может потребовать представления Акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: <http://journals.spbstu.ru>

Статьи подаются в формате .docx (MS Word 2007–2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Список литературы, название статьи, вся информация об авторах задаются при подаче через электронную редакцию в отдельных полях. В тексте статьи должны быть ссылки на все источники из списка литературы. Порядковый номер источника в тексте статьи указывается в квадратных скобках.

2.2. Оформление материалов

2.2.1. Объем статей, как правило, 15–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий не должно превышать 4, таблиц – 3.

2.2.2. Число авторов — не более трех от одной организации и не более пяти от разных организаций. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.2.3. Статья должна содержать следующие разделы:

— номер УДК в соответствии с классификатором;

— фамилии авторов на русском и английском языках;

— название на русском и английском языках;

— аннотация — 3–5 предложений на русском и английском языках;

— ключевые слова – не менее 2 и не более 7 на русском и английском языках;

— введение (актуальность, краткое обоснование существующей проблемы) — 1,0–1,5 стр.;

— цель работы (краткая четкая формулировка поставленной задачи);

— методика проведения исследований и расчетов, включая краткую информацию об использованных приборах, методах и точности экспериментальных измерений и теоретических расчетов и т. д.;

- результаты исследований;
- обсуждение результатов;
- выводы или заключение;
- список литературы – не менее 7–10 источников;
- сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;
- e-mail и адрес для корреспонденции автора, ответственного за переписку.

2.2.4. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул – в редакторе MS Equation.

Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст. Таблицы должны быть составлены лаконично, однотипные таблицы строятся одинаково. Цифровые данные следует округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться.

Шрифт – TNR, кегль шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5. Таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева 3 см, сверху, снизу 2,5 см, справа 2 см. Текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

2.3. Рассмотрение материалов

Представленные материалы первоначально рассматриваются редакционной коллегией, после чего передаются на рецензирование. После одобрения материалов и согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Более подробную информацию можно получить по телефону/факсу редакции:

(812) 294-47-72 (с 10 до 18 часов, Олег Александрович)

или по e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Научное издание

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 1 (190) 2014

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия
(свидетельство ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006 г.)

Научный редактор, корректор — канд. техн. наук доцент *Л.В. Спиридонова*
Технический секретарь — *О.А. Матенев*
Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой*

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 26.03.2014. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 32,0. Тираж 1000. Заказ 73.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Отпечатано в типографии издательства:
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.