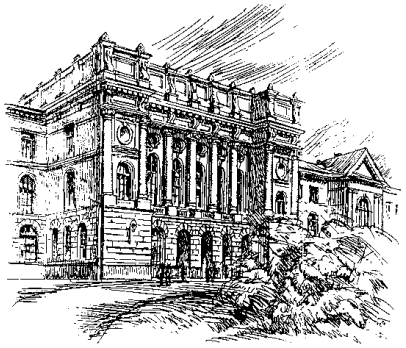
2(171)/2013



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;
Костюк В.В., академик РАН; Лопота В.А., чл.-кор. РАН;
Окрепилов В.В., академик РАН; Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН; Федоров М.П., академик РАН.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (главный редактор); *Арсеньев Д.Г.,* д-р техн. наук, профессор;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор (зам. гл. редактора);
Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор; *Глухов В.В.,* д-р экон. наук, профессор;
Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор; *Иванов А.В.,* д-р техн. наук;
Иванов В.К., д-р физ.-мат. наук, профессор; *Козловский В.В.,* д-р физ.-мат. наук, профессор;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН (зам. гл. редактора); *Юсупов Р.М.,* чл.-кор. РАН.

РЕДАКЦИЯ

Васильев Ю.С., академик РАН (главный редактор);
Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор;
Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор;
Акопова М.А., д-р пед. наук, профессор;
Бабкин А.В., к. техн. наук, д-р экон. наук, профессор;
Гуменюк В.И., д-р техн. 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;
Кузнецов Д.И., д-р филос. наук;
Рассохин В.А., д-р техн. наук, профессор;
Снетков В.Н., д-р полит. наук, профессор;
Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор.

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 ВИНИТИ 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 Национальной 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, 2013

Содержание

Гусев Б.В. *Российская инженерная академия на современном этапе* 10

Васильев Ю.С. *О вкладе Политехнического университета в комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений* 17

Дегтярева Р.В. *Реструктуризация в Политехническом университете*..... 25

Попович А.А. *Становление Объединенного научно-технологического института* 31

Железняков А.Б., Кораблев В.В. *От «Ариабады» до полета на Марс*..... 38

Энергетика. Электротехника

Беляев Н.А., Егоров А.Е., Коровкин Н.В., Чудный В.С. *Анализ балансовой надёжности как актуальная задача развития электроэнергетических систем ЕЭС России*..... 44

Боришанский К.Н. *Разновидности автоколебаний лопаток паровых турбин и меры борьбы с ними*.. 52

Галышев Ю.В., Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Метелев А.А. *Влияние электромагнитного воздействия на показатели топлива и характеристики автомобильных двигателей внутреннего сгорания*..... 61

Батухтин А.Г., Кобылкин М.В. *Автоматизированная система регулирования расхода теплоносителя для теплоснабжения групп потребителей*..... 68

Лапшин К.Л. *Особенности компьютерной оптимизации проточных частей газовых турбин со скольжением роторов* 73

Басс М.С., Батухтин А.Г., Требунских С.А. *Методические вопросы оценки эффективности систем централизованного теплоснабжения* 80

Соколов Н.П., Полищук В.Г., Андреев К.Д. *Гидравлическое сопротивление каналов прямоугольного сечения со скрещивающимся оребрением* 85

Золотых А.Г., Халилов Ф.Х. *Требования к защитным аппаратам нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ*..... 95

Металлургия и материаловедение

Попович А.А., Ван Цин Шен. *Исследование процесса получения катодного материала Li_2FeSiO_4 путем кристаллизации из аморфного состояния*..... 102

Анастасиади Г.П. , Кондратьев С.Ю. , Орыщенко А.С. , Фукс М.Д. *Влияние скорости охлаждения при технологическом термоциклировании на длительную прочность литого жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2* 109

Попович А.А., Разумов Н.Г., Силин А.О. *Исследование фазообразования в системе Fe-Ni при механолегировании* 120

Климова О.Г., Туричин Г.А., Лопота В.А., Шамшурин А.И., Сизова И.А. *Особенности структуры металла сварных соединений при электронно-лучевой сварке разнородных материалов* 125

Юркинский В.П., Фирсова Е.Г., Оковитый В. В. *Влияние способа оксидирования сталей 20 и 12Х18Н10Т на пористость оксидных покрытий*..... 133

Демидов А.И., Маркелов И.А. *Термодинамика взаимодействия оксидов железа с графитом с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры в интервале 900–1600 К*..... 138

Фомин Д.Ю. *Формирование структуры в сталях аустенитного класса при штамповке в открытых штампах* 146

Баймаков А.Ю., Петрович С.Ю., Липин В.А., Шахмин А.Л., Еремин Е.А. *Генерация водорода при взаимодействии порошков металлов и сплавов системы алюминий-магний с водой, кислотным и щелочным растворами* 151

Кретушева И.В., Мишин М.В., Александров С.Е. *Некоторые закономерности получения наночастиц диоксида кремния в низкотемпературной плазме атмосферного давления* 158

Машиностроение

Мазурин В.Л. *Полиуретан как конструкционный материал XXI века* 165

Лебедев В.А., Соколов С.А. *Исследование перекосов металлических конструкций кранов мостового типа* 171

Русинов Р.В., Элизов А.Д., Добрецов Р.Ю. *Двигатели внутреннего сгорания с повышенной степенью расширения горючей смеси* 177

Ахметшин Т.Д., Носов В.В. *Определение ресурса технических объектов на основе идентификации этапа однородного разрушения* 182

Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования

Петриченко М.Р. *Термодинамические тождества и уравнения неизотермической фильтрации в изотропной пористой среде* 188

Гиргидов А.Д. *Замечания о гидравлике центробежного литья труб* 193

Грязнов Н.А., Панталеев С.М., Иванов А.Е., Кочкарёв Д.А., Куликов Д.С. *Высокопроизводительный метод измерения координат объектов в условиях космического пространства* 197

Ташевский А.Г. *Верификация результатов испытаний сложных технических систем* 203

Ковалевский А.И. *Совершенствование технологии сварки плавящимся электродом* 211

Григорьев Б.В. *Экспериментальное исследование промерзания песчаных грунтов в равновесных и неравновесных условиях* 216

Лукашевич А.А. *Расчетные модели контактного взаимодействия и разрушения деформируемых тел с применением контактных конечных элементов* 221

Зацепина М.Е., Кирилловский В.К. *Современный количественный теневой метод с применением средств компьютерных технологий* 226

Грачёв Д.А., Бобров А.И., Чугров И.А., Ершов А.В., Павлов Д.А. *Массивы нанокристаллов кремния в матрице SiO_2: структура и люминесцентные свойства* 231

Ярусова О.Г. *Разработка модульной детской мебели для дошкольного образовательного учреждения* 238

Природопользование

Галичина А.А., Карсеев А.Ю., Давыдов В.В., Дудкин В.И. *Использование топливных нефтяных эмульсий в энергетических установках предприятий* 243

Кулинкович А.В., Гуменюк В.И. *Кооперативный характер генерации перекисных соединений при радиолизе водных растворов уранилов* 248

Техносферная безопасность

Кулинкович Ю.Ю., Гуменюк О.В. *Факторы и механизмы массовой паники при чрезвычайных ситуациях* 261

Добровольский В.С., Дубаренко К.А. *Проблемы безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций объектов экономики* 268

Шкаликов В.А., Бышевская А.В. *Воздействия водотоков на состояние автомобильных дорог (на примере территории Смоленской области)* 277

Гуменюк В.И., Кармишин А.М., Киреев В.А. *О количественных показателях опасности техногенных аварий* 281

Туманов А.Ю. *Разработка системы поддержки принятия решения по оценке риска аварий на потенциально опасных объектах* 289

Вопросы образования

Речинский А.В., Никифоров В.И., Черненькая Л.В. *Разработка образовательных стандартов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета как реализация программы развития российского образования на 2013-2020 годы* 300

Акопова М.А., Попова Н.В. *Инновационные аспекты содержания обучения иностранным языкам в современном вузе (проект IELTS)* 309

Боронин В.Н., Кириллов А.И., Коровкин Н.В., Сапожников С.З. *Содержание фундаментального инженерного образования в институте энергетики и транспортных систем СПбГПУ* 316

Амосов В.В., Вишневская Т.А., Молодяков С.А., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г. *Новые технологии вычислительной техники в учебных планах кафедры информационных и управляющих систем СПбГПУ* 322

Поршнева Е.Г., Туманов А.Ю. *Методика анализа результатов тестирования студентов по физике при зачислении на факультет военного обучения СПбГПУ* 332

Contents

Gusev B.V. *Russian Academy of Engineering at the present stage* 10

Vasiliev Yu.S. *On the contribution of the Polytechnic University of complex defenses Saint-Petersburg flood* 17

Degtyareva R.V. *The restructuring of the polytechnic university* 25

Popovich A.A. *Becoming of the Joint Science and Technology Institute* 31

Zheleznyakov A.B., Korablev V.V. *From «Ariabady» before the flight to Mars* 38

Energetics. Electrical engineering

Belyaev N.A., Egorov A.E., Korovkin N.V., Chudny V.S. *Resource adequacy analysis as a pressing problem of progress of russian power networks*..... 44

Borishanskii K.N. *Differets forms of steam turbines blades flutter and methods of flutter prevention*..... 52

Galyshev Yu.V., Shabanov A.Yu., Zaitsev A.B., Metelev A.A. *The effect of electromagnetic effects on performance and characteristics of motor vehicle fuel combustion engines*..... 61

Batuhtin A.G., Kobylkin M.V. *Automated control system coolant flow for heat group consumer* 68

Lapschin K.L. *Features of computer optimization of gas turbine flow areas with sliding of rotors*..... 73

Bass M.S., Batuhtin A.G., Trebunskikh S.A. *Methodological issues for evaluating effectiveness district heating systems*..... 80

Sokolov N.P., Polishchuk V.G., Andreev K.D. *The hydraulic resistances in the rectangular cross-section channels with crossed ribs*..... 85

Zolotykh A.G., Halilov F.H. *Requirements for protective devices neutral power transformers 6–35 kV*..... 95

Metallurgy and materials technology

Popovich A.A., Wang Qing Sheng. *Research technology receipt of cathode material Li_2FeSiO_4* 102

Anastasiadi G.P., Kondratyev S.Yu., Orischenko A.S., Fuks M.D. *The effect of cooling speed by technological thermal cycling on the long-term strength of cast heat-resistant alloy 45Cr26Ni33Si2Nb2* 109

Razumov N.G., Popovich A.A., Silin A.O. *Research phase formation in Fe-Ni system by mechanical alloying* 120

Klimova O.G., Turichin G.A. , Lopota V.A., Shamshurin A.I., Sizova I.A. *Structure features of the metal welded by electron beam welding of dissimilar materials* 125

Yurkinsky V.P., Firsova E.G., Okovity V.V. *The effect of carbon steel (types steel c1020) and stainless steel (types steel 321) oxidation technique on the porosity of oxide coatings* 133

Demidov A.I., Markelov I.A. *Thermodynamics of interaction of iron oxides with graphite taking into account the changing of wustite composition with temperature in the temperature range 900–1600 K*..... 138

Fomin D.Yu. *Structure formation in austenitic steels under forging in open stamps* 146

Baimakov A.Yu., Petrovich S.Yu., Lipin V.A., Shahmin A.L., Eremin E.A. *Hydrogen generation at interaction of powders of metals and aluminum-magnesium system alloys with water, acid and alkaline solutions* 151

Kretysheva I.V., Mishin M.V., Alexandrov S.E. *Some regularities of formation of silicon dioxide nanoparticles in low temperature atmospheric pressure plasma* 158

Mechanical engineering

Mazurin V.L. *Polyurethane – structural material of xxi century* 165

Lebedev V.A., Sokolov S.A. *The study skews of metal constructions of cranes overhead type* 171

Rusinov R.V., Elizov A.D., Dobretsov R.U. *Internal combustion engines with increased expansion ratio of explosive mixture* 177

Akhmetshin T.D., Nosov V.V. *Assessment of the strength of construction materials founded in the phase of homogeneous destruction* 182

Mathematical Methods. Modeling. Experimental studies

Petrychenko M.R. *The thermodynamic identity and equation nonisothermal filtration in porous medium isotropic* 188

Girgidov A.D. *Remarks to the hydraulic centrifugal casting pipes* 193

Grjaznov N.A., Pantaleev S.M., Ivanov A.E., Kochkarev D.A., Kulikov D.S. *High performance measurement reference objects in space to the hydraulic centrifugal casting pipes* 197

Tashevsky A.G. *Verification test results of complex technical systems* 203

Kovalevsky A.I. *Improvement technology consumable electrode welding* 211

Grigoriev B.V. *Experimental study of freezing of sandy ground in equilibrium and disequilibrium conditions* 216

Lukashevich A.A. *Computational models of contact interaction and destruction of deformable bodies using the contact finite elements* 221

Zatsepina M.E., Kirillovskii V.K. *The modern quantitative shadow method based on the application of the computer technology* 226

Grachev D.A., Bobrov A.I., Chugrov I.A., Ershov A.V., Pavlov D.A. *Arrays of silicon nanocrystals in sio_2 matrix: structure and luminescent properties* 231

Yarusova O.G. *Modular elaboration of children furniture for preschool educational institutions* 238

Nature Management

Galichina A.A., Karseev A.U., Davydov V.V., Dudkin V.I. *The use of fuel oil emulsion for the power installations on enterprises* 243

Kulinkovich A.V., Gumenyuk V. I. *The cooperative nature of generation peroxy compounds for radiolizis of the aqueous solutions uranils* 248

Technosphere Safety

Kulinkovich J.J., Gumenyuk O.V. *Factors and mechanisms of mass panic in emergencies* 261

Dobrovolsky V.S., Dubarenko K.A. *Problems security and protection in emergency situations of economic facilities* 268

Shkalikov V.A. Byshevskaya A.V. *Effects of watercourses on the condition of motor road (illustrated Smolensk region)* 277

Gumenjuk V.I., Karmishin A.M., Kireev V.A. *About quantitative indicator of danger man-made accidents* 281

Tumanov A.Yu. *Development of a system to support a decision to assess the risk of accidents on potentially hazardous installations* 289

Educational issues

Rechinskii A.V., Nikiforov V.I., Chernenkaya L.V. *The development of educational standards, Saint-Petersburg state polytechnic university as the implementation of the program of development of Russian Education for the years 2013-2020*..... 300

Akopova M.A., Popova N.V. *Innovational aspects of foreign language teaching content in modern university (project IELTS)*..... 309

Boronin V.N., Kirillov A.I., Korovkin N.V., Sapozhnikov S.Z. *The content of the fundamental engineering education at the institute of energy and transport systems SPbSPU*..... 316

Amosov V.V., Vishnevskaya T.A., Molodyakov S.A, Ustinov S.M., Chernorutsky I.G. *New technologies of computer science in the curriculum department of information and control systems SPbSPU* .. 322

Porshneva E.G., Tumanov A.Yu. *A method for the analysis of physics aptitude test results for students admission to the military training department of Saint-Petersburg state polytechnic university* 332

ПОЗДРАВЛЕНИЕ

Лауреат премии «Глобальная энергия» 2013 года
Владимир Евгеньевич Фортов

В рамках Петербургского международного экономического форума 21 июня 2013 года состоялась торжественная церемония вручения Международной энергетической премии «Глобальная энергия».

За 11 лет существования премии «Глобальная энергия» ее лауреатами становились ученые из Великобритании, Германии, Исландии, Канады, России, США, Украины, Франции и Японии. Всего с 2003 года обладателями престижной награды стали 29 человек.

В 2013 году одним из лауреатов премии «Глобальная энергия» за исследования теплофизических свойств и мощных импульсных энергетических устройств, положенных в основу создания импульсных генераторов, сильноточных токоограничителей, имитаторов ударов молний высоковольтных линий электропередач и эффективных устройств преобразования энергии, стал выдающийся российский ученый, президент Российской академии наук, почетный доктор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Владимир Евгеньевич Фортов.

Желаем Вам, Владимир Евгеньевич, дальнейших успехов в научной деятельности.

Редакционная коллегия

УДК 001:60

Б.В. Гусев

РОССИЙСКАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

B.V. Gusev

RUSSIAN ACADEMY OF ENGINEERING AT THE PRESENT STAGE

В материале статьи обобщен 20-летний опыт работы Российской инженерной академии (РИА), представлены основные направления при выполнении РИА инновационных программ, показана работа региональных структур академии. Большая работа выполнена по организации международных и общероссийских форумов.

АКАДЕМИЯ. ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ. РЕГИОНЫ. ФОРУМЫ. СИСТЕМА ОБРАЗОВАНИЯ.

The article article summarizes 20 years of experience in the Russian Engineering Academy (RIA), the main trends in carrying out RIA innovative programs, shows the operation of regional structures of the academy. Much work has been done on the organization of international and all-Russian Forum.

ACADEMY. INNOVATIVE PROGRAMS. REGIONS. FORUMS. THE EDUCATION SYSTEM.

Российская инженерная академия — правопреемница Инженерной академии СССР, созданной 13 мая 1990 года, и в Российской Федерации зарегистрирована Министерством юстиции 24 декабря 1991 года как общероссийская общественная организация «Российская инженерная академия (РИА)». В 2001 и в 2004 годах РИА получила государственную аккредитацию.

Российская инженерная академия проводила и проводит большую работу по организации эффективной деятельности инженерного сообщества Российской Федерации. При этом акцент делается на содействие развитию инженерных направлений реального сектора экономики.

В состав РИА входят более 1350 действительных членов и членов-корреспондентов — видных российских ученых, инженеров и организаторов производства, а также свыше 700 коллективных членов, являющихся крупнейшими российскими производственными организациями, и более 40 региональных инженерно-технических структур — отделений РИА.

За более чем двадцатилетний срок существования Российской инженерной академии ее членами разработано около 4 тысяч новых технологий, опубликовано более 6,5 тысяч монографий, получено более трех тысяч патентов, 74 Государственные премии и 350 премий Правительства. Ежегодный объем научно-исследовательских, проектных и других видов работ в области инженерной деятельности составляет от 0,5 до 1 млрд рублей. В числе приоритетных направлений деятельности РИА: информатизация общества на основе использования современных информационных технологий; применение нанотехнологий и наноматериалов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства; создание новых теплоизоляционных материалов для конструкций стен зданий; средства контроля технического состояния комплексов и систем различ-

ного назначения для обеспечения мониторинга состояния среды и сооружений; использование изделий и технологий двойного назначения при создании высокотехнологичной продукции, диверсификация оборонно-промышленного комплекса и др.

Вот несколько конкретных примеров из деятельности секций и региональных отделений РИА.

В XX веке получены серьезные подтверждения устойчивой связи большого количества имеющихся в распоряжении человека научных и технологических знаний с всеобщими законами устройства природы, общества и человека. Понимание механизмов этих связей позволило ученым РИА выделить области стратегических технологий жизнедеятельности, создающих условия для активного творческого долголетия человека:

биомедицинские технологии поддержания здоровья, контроля и управления состоянием человека;

технологии воспроизводства, трансформации и эффективного потребления природных энергетических ресурсов;

технологии утилизации водных и продовольственных ресурсов;

технологии ресурсосбережения, вторичной переработки (утилизации) химических и ядерных отходов;

технологии прогнозного мониторинга и предотвращения критических состояний экотехнологических систем.

Несомненно, что разработка и внедрение перечисленных технологий — наиболее перспективная проблема, стоящая перед учеными и специалистами Академии.

Большие работы ведутся членами Академии в области судостроения, в первую очередь — на базе предприятия «Адмиралтейские верфи». Созданы новые классы арктических судов, в том числе сухогрузы с возможностью выполнения функций ледоколов во льдах толщиной до двух метров. Ведутся работы по комплектации нефтегазовых платформ для освоения шельфа Баренцева моря и на Сахалине. Работая в партнерстве с компаниями из ведущих индустриальных стран, Академия проводит исследования в направлении создания сложных морских информационных и роботизированных подводных комплексов-роботов. Суть проекта мы видим в модернизации подводного технического сервиса на континентальном шельфе, в портах, ГЭС, озерах и водных путях.

Проводится целый комплекс работ в области материаловедения. Речь идет, прежде всего, о новых технологиях и материалах в области композитного авиастроения и создания высоконадежных элементов конструкций авиационной техники (высокомодульные армированные композиты), а также применения наноматериалов в изделиях машиностроения. Пример — разработка новых углепластиковых композитов, предназначенных для оболочковых систем, входящих в состав комплекса «РК-Протон-М». Для РКК «Энергия» отработана технология изготовления составных частей космического аппарата «Ямал-300».

Большую теоретическую и практическую значимость представляют работы, направленность которых определяет уровень создания интегральных и компьютеризированных систем, обеспечивающих оптимизацию параметров технологии изготовления конструкций сложной формы из металлов, а также металлополимеров. Доказано, что наиболее перспективны технологические процессы производства изделий авиационной техники из композиционных материалов с высоким уровнем механизации и автоматизации управления процессом. В этом направлении завершен комплекс работ по созданию прогрессивных технологий формообразования намоткой конструкций различных геометрических форм и размеров, что стало значительным вкладом в промышленное внедрение этого наиболее автоматизированного технологического процесса при производстве изделий авиационной техники нового поколения.

Проведены научные исследования в области создания силовых конструкций из композиционных материалов для самолета МС-21 и SSJ-NG; разработана конструкторская документация и изготовлен прототип крыла, состоящего на 90 % из композиционных материалов, организовано производство агрегатов из композиционных материалов для самолета SSJ-100.

Особенно серьезное внимание уделяется использованию волновых технологий для модификации бензина, дизельного топлива. Получены переслаивающиеся эмульсии типа «топливо — вода» на волновых генераторах, что по-

зволяет повышать октановое число топлива с одновременным снижением вредных выбросов в атмосферу окиси углерода и азота.

Определенный интерес представляют исследования по созданию тепловых насосов, которые, образно говоря, представляют собой «вывернутый наизнанку холодильник». При их использовании на один киловатт электроэнергии можно получить до трех киловатт тепловой энергии. Причем коэффициент полезного действия, превышающий единицу, связан не с представлениями о «вечном двигателе», а с использованием тепловых зон с температурой больше температуры окружающей среды.

Члены нашей Академии начали работу над очень интересным наукоемким проектом, связанным с разработкой технологий для синтеза биогаза в реакторах новой конструкции. Думаю, этот проект можно отнести к разряду революционных. Его реализация может в значительной мере решить проблемы обеспечения теплом и электроэнергией целых стран. Разрабатывается новый класс компактного высокопроизводительного оборудования на основе переработки биомассы в реакторе каталитического гидрокрекинга, которое позволит экологически безопасным путем эффективно использовать естественные биологические субстанции — торф и водоросли, полностью утилизировать жидкие и полужидкие органические отходы животноводства, птицеводства, целлюлозно-бумажного, гидролизного и пищевого производства, а также иное органическое сырье для производства горючих газов, тепла и электроэнергии. Производительность реактора безотходного синтеза биогаза (РБС) может составить от 5 до 2500 м^3/сутки. Принцип работы реактора заключается в термохимической переработке отходов при повышенных температурах и давлениях.

Широко ведутся работы по использованию нанотехнологий при получении различных материалов. Это позволит обеспечить высокие технические характеристики конструкций, существенно повысить их эксплуатационную надежность, улучшить экологические показатели и, безусловно, даст большую экономическую выгоду от их внедрения.

Можно привести один из практических примеров, достаточно наглядно поясняющий суть этой работы, — исследования процессов наноструктурирования в мелкозернистых бетонах с добавкой наночастиц диоксида кремния. Объектом исследования были выбраны мелкозернистые бетоны для дорожных изделий. Такие бетоны классом по прочности $B60$ и по морозостойкости $F > 300$ можно получить методом вибропрессования. В ходе исследований удалось путем введения минеральных ультрадисперсных и нанодисперных частиц диоксида кремния получить бетон прочностью до 130 МПа. В настоящее время ведутся работы по получению наночастиц диоксида кремния на дезинтеграторе оригинальной конструкции. Уникальность данного измельчителя заключается в совершенно ином физическом подходе к помолу материалов, который при небольших энергозатратах позволяет получить порошок диоксида кремния нанодисперсных размеров и в 2–2,5 раза увеличить прочность бетона.

К важным задачам сегодня следует отнести использование систем генерации в перекачивающих системах для нефтегазовой промышленности при транспортировке нефти и газа. Турбостроение можно довести до состояния, которое позволит достичь КПД двигателей порядка 70 %.

В Академии идет изучение волновых технологий, которые позволяют создавать различные биорезонансные режимы, в том числе в эмульсиях и суспензиях, и обеспечивать получение материалов высокой степени измельчения с присутствием достаточного количества наночастиц.

В работах по проблемам безопасности созданы трехмерные вибродатчики, позволяющие оценить состояние надежности сооружений, четко указывая нахождение в них максимально слабых мест или мест, которые при сейсмических воздействиях могут оказаться в неблагоприятном состоянии. Таким образом, появляется возможность заранее усилить эти слабые элементы. Информативность при трехмерном измерении, причем с меньшим количеством датчиков, возрастает до трех раз.

Рациональное развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и мегаполисов в первую очередь сталкивается с проблемой развития различных видов транспорта, например мобильного метрополитена, главная идея которого — вынести станцию метрополитена на поверхность, чтобы сократить затраты на строи-

тельство подземных станций и уменьшить время нахождения в пути для пассажиров в 2–3 раза.

Существенно расширилась «география» научно-практической деятельности РИА.

Так, региональное отделение **в Башкортостане** проводит работы в области теории проектирования волоконно-оптических устройств. разрабатывает теорию предупреждения столкновения летательных аппаратов методом имитационного моделирования. Здесь впервые разработаны: технологический процесс алмазного шлифования лопаток газотурбинных двигателей; модель экологической безопасности региона; системы сертификации отраслей и методика их использования.

Московское областное отделение Академии большое внимание уделяет вопросам использования в различных отраслях производства, техники и технологий инженерных разработок оборонно-промышленного комплекса. И в целом РИА в последнее время активизировала деятельность в этом направлении. Можно отметить в этом плане работу в Экспертном совете по проблемам законодательного обеспечения развития оборонно-промышленного комплекса при Председателе Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации, рабочие встречи с заместителем Председателя Правительства Российской Федерации Д.О. Рагозиным и первым заместителем председателя Военно-промышленной комиссии при правительстве Российской Федерации О.И. Бочкаревым, участие в экспертизе проектов фонда перспективных исследований в сфере о**боронно-промышленного комплекса.**

Члены **Санкт-Петербургского отделения** РИА активно работают в области судостроения, машиностроения, электроники и оптоэлектроники.

В Иркутской области члены РИА проводят активные работы по проектированию заводов газо- и нефтепереработки, созданию нормативов для оценки остаточного ресурса оборудования, работающего под большим давлением.

Омское отделение эффективно участвует в реализации предложенной администрацией области программы «Омский локомотив», которая была широко представлена в законодательных структурах Российской Федерации.

В **Приморье** Дальневосточное отделение РИА разрабатывает методы синтеза адаптивных и самонастраивающихся систем управления многосвязных нелинейных динамических систем в условиях неопределенности и переменности их параметров.

Псковское региональное отделение проводит большую работу по направлению «Исследования в области микро- и нанотрибологии». Создаются технологии и приборы в области пьезомагнетизма и пьезоэлектричества, а также наноэлектромеханические системы.

На Урале **Свердловским региональным отделением** осуществлены крупные разработки в области энергосбережения, здесь активно работает региональный «Институт энергосбережения». Выполнены работы по переработке техногенных отходов, накопившихся за 300 лет существования промышленного Урала.

В **Томской области** ученые и инженеры — члены регионального отделения Академии — эффективно работают в области теории построения интеллектуальных систем автоматизации технологических процессов. Они приняли непосредственное участие в формировании региональной программы «Оптимизация использования природных, производственных и интеллектуальных ресурсов Томской области».

Для инженерных объектов **Западной Якутии** члены РИА разработали геофизический комплекс, позволяющий не только отслеживать существующее положение грунтов под основаниями сооружений, но и давать прогнозы направления геокриологических процессов. Обоснована расчетная схема свайных фундаментов зданий и сооружений с многолетнемерзлыми грунтами в условиях второго предельного состояния. Установлено расчетами и предварительными экспериментальными исследованиями на моделях, что несущая способность мерзлых грунтов основания рифленых свай значительно выше свай с гладкой боковой поверхностью. Экспериментально доказана возможность хранения семян и зеленой биомассы в сооружениях, размещенных в толще многолетнемерзлых пород. При поддержке Правительства, Президента Республики Саха (Якутия) и Сибирского отделения РАН на территории Института мерзлотоведения на глубине 10 м создается Федеральное (международное) криохранилище семян культурных, редких и исчезающих видов растений (более 100 тысяч сорто-образцов) объемом 464 м^3.

Одна из приоритетных задач РИА на очередном этапе деятельности — обеспечение конструктивного взаимодействия с федеральными и региональными органами законодательной и исполнительной власти в целях активного использования интеллектуального потенциала научно-инженерных структур для общественной экспертизы государственных решений в области инженерной деятельности, имеющих общенациональное значение.

Успешная модернизация экономики и социальной сферы предполагает выстраивание эффективных механизмов взаимодействия общества, бизнеса и государства, направленных на координацию совместных усилий при выработке и проведении социально-экономической политики. Вместе с тем отсутствие системности в этом взаимодействии существенно снижает эффективность решения задач инновационного развития России.

Государство не ставит в число приоритетных задач создание гражданского общества в стране. Определенные средства выделяются на деятельность партий. При этом массовые общественные организации такой поддержки не имеют. Между тем общественность в состоянии обеспечить независимую оценку качества предлагаемых проектов, особенно в части нормативной базы обороны и безопасности, ЖКХ, в строительстве, в природоохранной деятельности. Только всесторонний **общественный** контроль (экспертиза, анализ) в современных условиях способен приостановить в ряде случаев деструктивную деятельность. Примеры последнего времени (Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожнего, мост через р. Волгу в г. Волгограде, жилищно-коммунальное хозяйство, транспортные проблемы российских мегаполисов) свидетельствуют об аварийном состоянии основных фондов. Инженерная общественность Москвы в свое время пыталась предупредить нарушения в проектировании и строительстве Крылатского конькобежного центра, предостерегая, что в течение 5 лет он придет в аварийное состояние. К этому мнению не прислушались — итог известен. Сейчас аналогичная картина сложилась со строительством объектов в районе г. Сочи, где произошел ряд аварий. Всем известно о просчетах в проектировании и возведении моста к острову Русский в г. Владивостоке.

С учетом сказанного мы полагаем необходимым развернуть действенную работу по регламентированию с помощью организационных и экономико-правовых механизмов (грантовая поддержка, государственный и социальный заказ, налоговые механизмы и др.) системы реального взаимодействия органов власти с общественными некоммерческими организациями.

Российская инженерная академия выступала и выступает активным организатором крупных всероссийских и международных форумов, посвященных актуальным вопросам инновационного развития экономики России. Среди них целесообразно отметить: первый и второй Съезд инженеров России, специализированные выставки и конференции «Изделия и технологии двойного назначения. Диверсификация ОПК», Всероссийскую научно-техническую конференцию «Резервы ускорения экономического роста и удвоения ВВП», общероссийский форум «Использование космоса в мирных целях», международные конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов», Международную научно-техническую интернет-конференцию «Проблемы создания наноматериалов и развитие нанотехнологий в строительстве», конференцию «Малая и нетрадиционная энергетика, энергоэффективность», международные научные форумы «Перспективные задачи инженерной науки». Большинство из перечисленных мероприятий проводится систематически, с периодичностью в 1–2 года. Президиум РИА принял решение о проведении ряда форумов с использованием современных информационных технологий в режиме онлайн-конференций.

Российская инженерная академия активно участвует в формировании молодой смены инженерного корпуса и повышении престижности инженерного образования. Членами академии являются президенты и ректора крупнейших вузов страны, представители профессорско-преподавательского корпуса. Среди руководителей структурных подразделений РИА (секции, региональные отделения) — видные организаторы российского профессионального образования: ректор Московского технического университета связи и информатики А.С.Аджемов, президент Санкт-Петербургского политехниче-

ского университета Ю.С. Васильев, ректор Московского государственного университета природообустройства Д.В. Козлов, ректор Камского института гуманитарных и инженерных технологий В.А. Никулин, ректор Липецкого государственного технического университета А.К. Погодаев и др. На протяжении многих лет бессменным председателем конкурсной комиссии РИА является Юрий Сергеевич Васильев.

Наиболее активно участвуют в реализации научно-техничесчких проектов Башкирский государственный университет, Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, Ижевский государственный технический университет, Казанский государственный технический университет, Мордовский государственный университет, Московские государственный технический университет (МГТУ-МВТУ), государственный университет путей сообщения, государственный университет дизайна и технологии, государственный строительный университет и государственный энергетический университет, Пензенский государственный технический университет, Санкт-Петербургские государственный политехнический университет и государственный университет технологии и дизайна, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Югорский государственный университет и многие другие вузы страны.

Только за последние десять лет более 150 представителей вузовской общественности были представлены к высоким наградам научно-инженерной общественности за победы в конкурсах, проводимых Высшим инженерным советом и Российской инженерной академией на лучшие научно-технические разработки. Особый интерес вызвали исследования, проведенные в следующих направлениях: модернизация энергетики и ядерной энергетики, энергосбережение; инновации в системе информатики, вычислительной техники, космоса и связи; развитие технологий в машиностроении, на транспорте, в экологии; модернизация агропромышленного комплекса, строительства и промышленности строительных материалов.

Активную общественную позицию РИА занимает не только в вопросах технологического развития страны. На этапе реформирования высшей профессиональной школы была развернута серьезная работа по сохранению инженерного образования в России. Вопросы оценки состояния и выбора основных направлений развития профессионального образования в стране нашли свое отражение при разработке «Декларации участников Второго съезда инженеров России», подготовке предложений для Комиссии по модернизации при Президенте РФ, в документах и резолюциях общих собраний Российской инженерной академии, статьях и выступлениях на конференциях и семинарах в период с 2009–2013 гг. Основной тезис, который Академия попыталась донести до исполнительной и законодательной власти: система профессионального образования — основа динамичного экономического роста и социального развития общества, фактор благополучия граждан и безопасности страны и, как следствие, важнейшее условие для формирования инновационной экономики. При реализации органами законодательной и исполнительной власти программы модернизации российского профессионального образования как нигде велика цена возможной ошибки. Причем ее последствия могут быть выявлены спустя только десятилетия! Мы реально сегодня встали перед фактом, когда инженерные профессии девальвируются практически со студенческой скамьи: число специальностей с присвоением квалификации «инженер» максимально сокращено в угоду «бакалавриату» и «магистратуре». Практика показывает, что магистры и бакалавры, не находящие сейчас достаточной востребованности в промышленном производстве, могут тяжким бременем повиснуть на российской экономике.

В связи с вышесказанным представляется целесообразным по всем направлениям и специальностям подготовки инженерно-технических кадров определить для них квалификацию «ИНЖЕНЕР» вне зависимости от сроков подготовки и области профессиональной деятельности выпускника (при необходимости можно для «магистров» и «бакалавров» разделить степень и квалификацию, например: степень – «магистр», квалификация — «инженер» или «магистр-инженер»), а квалификации «технолог», «конструктор» и т.п. сохранить только в наименовании специальности (направления) подготовки специалиста.

Считаем, что нужно твердо следовать правилу: не только не растерять лучшие традиции отечественного инженерного образования, но и приумножать их, принимая все необходимые меры для поднятия статуса высокого звания «инженер». Для этого следует сохранить, как минимум, в прежних объемах подготовку в вузах страны специалистов — инженеров с 5-летним циклом обучения, а по высокотехнологичным специальностям — и с 6-летним. Надо проявить заботу о формировании эффективной системы их послевузовского образования, профессиональной переподготовки и повышения квалификации.

Мы полагаем, что авторитет Российской инженерной академии приносят не только результаты научной и общественной деятельности, но и представление ее членов на присуждение различных государственных и общественных наград. Так, **Российский союз товаропроизводителей принял решение об увековечении памяти видного государственного деятеля — Алексея Николаевича Косыгина, с** этой целью учредив премию в области науки, техники и организации производства. Премия учреждена для поощрения ученых, специалистов и практиков, внесших существенный вклад в науку, технику, организацию производства. К 20-летию РИА ряд старейших ее членов стали лауреатами премии имени А.Н. Косыгина.

В заключение необходимо сказать, что нам предстоит существенно расширить практику создания творческих коллективов для выполнения актуальных научно-инженерных и инновационных программ в регионах, эффективнее работать в направлении повышения интереса молодых ученых и производственников к деятельности общественных академий инженерной направленности.

ГУСЕВ Борис Владимирович — *доктор технических наук профессор, член-корреспондент РАН, президент Российской инженерной академии, лауреат Государственных премий СССР и РФ.*
125009, г. Москва, Газетный пер. 9, стр. 4
(495) 629–9431
info-rae@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 626:627

Ю.С. Васильев

О ВКЛАДЕ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА В КОМПЛЕКС ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ОТ НАВОДНЕНИЙ

Y.S. Vasiliev

ON THE CONTRIBUTION OF THE POLYTECHNIC UNIVERSITY OF COMPLEX DEFENSES SAINT-PETERSBURG FLOOD

В результате строительства комплекса защитных сооружений была решена задача защиты Санкт-Петербурга от наводнений. В течении трех веков опасность наводнений угрожала городу. На разных этапах выполнения грандиозного проекта, по существу, проекта века, принимали участие профессора, преподаватели и выпускники СПбГПУ. В публикуемой в журнале статье это кратко и содержательно изложено.

КОМПЛЕКС ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ. ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ. НАВОДНЕНИЯ. СУДОПРОПУСКНЫЕ И ВОДОПРОПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. ДАМБА. ТУННЕЛЬ.

With the construction complex of protective installations problem was solved of the protection St. Petersburg from flooding. For three centuries, flood hazard threatened the city. On different stages of the grand projectis essentially project of the century was attended by professors, lecturers and graduates of Polytechnic University. In the published in the journal article is short and pithy stated.

COMPLEX OF PROTECTIVE STRUCTURES. POLYTECHNIC UNIVERSITY. FLOODING. NAVIGATION PASS AND CULVERTS. DAMS. TUNNELS.

Среди памятных дат в истории Санкт-Петербурга достойное место занимает 12 августа 2011 года. В этот день было официально завершено строительство и начата эксплуатация Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС). Церемонию открытия комплекса возглавил В.В. Путин. Руководители строительства на его завершающей стадии — В.И. Коган и В.И. Щекачихин — доложили о полной готовности всего гидротехнического объекта к постоянной эксплуатации.

Начало грандиозной стройки было положено 2 августа 1979 года Постановлением ЦК КПСС и Советом министров СССР «О строительстве сооружений защиты г. Ленинграда от наводнений». Этому предшествовало утверждение Технического проекта защиты Ленинграда от наводнений Советом Министров СССР (декабрь 1978 г.). Начало серьезных проектных работ следует отнести к 1966 году, когда были утверждены основные положения Генерального плана развития города. Генеральной проектной организацией, осуществляющей проектные работы, было назначено Ленинградское отделение Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-изыскательского института «Гидропроект» имени С.Я. Жука (ныне — «Ленгидропроект»). Соисполнителями выступали более 50 организаций проектного и научного профиля, а также ряд высших учебных заведений. Существенную роль сыграл и коллектив Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет).

Общая протяженность Комплекса защитных сооружений — 25,4 км, а по акватории самого залива — 22,2 км. В состав этого объекта входят 11 каменно-земляных дамб, 6 водопропускных и 2 судопропускных сооружения.

Кроме защиты Санкт-Петербурга от наводнений, КЗС решает еще одну важнейшую задачу, а именно организацию автомобильного

движения. Современная многополосная скоростная автомагистраль, замыкающая Кольцевую автодорогу вокруг Петербурга, идет по гребню дамб. Шесть полос движения; удобные транспортные развязки на южном, северном берегах и на острове Котлин; мосты, тоннель под морским каналом; современные системы наблюдений и обеспечения безопасности служат бесперебойному движению. Магистраль рассчитана на пропуск 30 тысяч автомобилей в сутки со скоростью 120 км/ч.

Участие коллектива СПбГПУ в реализации КЗС от наводнений можно разделить на три этапа. Первый этап, с 1966 по 1978 год, когда в ряде организаций города велись предпроектные разработки по проблемам защиты города от наводнений. Второй этап, с 1979 по 1990 год: участие политехников в научном обосновании проектных решений. Третий этап, с 2000 по 2011 год: участие сотрудников СПбГПУ в пусконаладочных работах. Кроме того, в период строительства в отдельные годы на объекте трудились студенческие строительные отряды Политехнического университета и проходили производственную практику студенты гидротехнического факультета.

В 1969 году был завершен заключенный ранее комплексный договор на проведение научных исследований по теме «Исследование по технико-экономическому обоснованию проекта защиты Ленинграда от наводнений». Эта работа состояла из трех разделов и выполнялась сотрудниками разных кафедр.

В научных исследованиях на первом этапе приняли участие профессора Д.С. Щавелев, Г.А. Радченко, А.Л. Можевитинов, Г.В. Симаков, а также сотрудники кафедр, аспиранты и студенты. Рекомендации, переданные организации Заказчика, были полностью реализованы в проекте.

На втором этапе работ активное участие приняли профессора М.П. Федоров, К.Н. Шхинек, А.С. Большов, Д.В. Марченко и др. В этот период были исследованы на физической модели условия взаимодействия судов с преградами (стенки шлюзов) и разработана математическая модель этого процесса.

На третьем этапе под руководством профессора А.В. Ащеулова выполнен ответственный цикл работ по пуску, наладке и испытанию 64 затворов и системы трубопроводов.

Важно отметить, что ряд оригинальных инновационных технических решений, предложенных учеными вуза, реализован. Однако самым важным вкладом СПбГПУ в проектирование и строительство Комплекса защитных сооружений — подготовка инженеров. Главные инженеры проектов С.С. Агалаков и С.Н. Кураев и многие начальники этой стройки, в том числе нынешний генеральный директор КЗС В.И. Щекачихин, окончили СПбГПУ.

На кафедре «Экономика и организация гидротехнического строительства» под руководством заведующего кафедрой профессора Г.А. Радченко в 1975 году была завершена работа по теме «Вопросы организации строительства сооружений по защите г. Ленинграда от наводнений». Коллектив исполнителей состоял из 7 человек: доцентов В.Т. Белоликова, В.П. Успенского, ассистента В.А. Леонова, лаборанта З.И. Красковской и студентов А.В. Евстратова, В.Г. Надха, А.А. Родного. В завершающем отчете выделены два раздела.

В первом обобщен мировой опыт устройства морских перемычек и оградительных сооружений для котлованов бетонных сооружений (судопропускных и водопропускных) комплекса защиты города от наводнений. В условиях строительства перемычек в открытой акватории моря на значительном удалении от берега как перспективные для дальнейшего проектирования рекомендованы три типа перемычек:

ячеистые цилиндрические перемычки из металлического шпунта, принятые в технико-экономическом обосновании за основной вариант;

комбинированные двухрядные перемычки из металлического шпунта с опорными островками (отдельно стоящие массивы-гиганты и другие конструкции);

наплавные перемычки из массивов-гигантов или железобетонных конструкций в виде ящиков.

В конкретных местах может быть применен любой из указанных типов.

Рекомендовалось также рассмотреть наплавной способ установки массивов-гигантов для повторного их применения и удобства окончательной разборки.

Во втором разделе рассмотрены вопросы организации и управления строительством соору-

жений по защите города от наводнений. Рекомендовано после создания генеральной подрядной организации осуществить прогрессивную (в то время) тенденцию — специализацию выполнения строительно-монтажных работ и кооперацию специализированных подразделений.

Для оптимального управления ходом строительства рекомендуется создание автоматизированной системы управления (АСУ). Подчеркивалось, что заказчик объекта должен выделить денежные средства и обеспечить фонды для АСУ.

За семь лет до этого отчета о НИР на кафедре была закончена работа на тему «Исследования по технико-экономическому обоснованию проекта защиты Ленинграда от наводнений. Соображения по конструкции дамбы и методам ее возведения». Она была выполнена Г.А. Радченко, Г.Я. Булатовым и В.П. Успенским. Как следует из библиографии, авторы проанализировали технические решения по 38 объектам, относящимся к дамбам, молам и волноломам, и 9 вариантам перемычек, а также 58 зарубежных публикаций. В конце отчета были сформулированы направления дальнейших исследований.

В 1975 году по договору с Ленгидропроектом на кафедре «Использование водной энергии» выполнялась научно-исследовательская работа «Исследование и расчеты экономической эффективности мероприятий защиты г. Ленинграда от наводнений с применением ЭВМ». В ней принимали участие Д.С. Щавелев, М.П. Федоров, В.Г. Еловенко, Л.В. Кочеткова, Н.В. Сорокина. Ими была разработана программа на языке АЛГОЛ-60 для ЭВМ типа «М-220», которая позволила рассмотреть варианты экономической эффективности комплекса защитных сооружений. Кроме того, был проанализирован диапазон исходных данных на показатели КЗС. Расчеты на ЭВМ «М-220» выполнялись в лаборатории кафедры вычислительной математики под патронажем В.А. Троицкого и В.И. Федорова-Бурова. Замечу, что годом ранее на кафедре ИВЭ была выполнена работа на тему «Разработка основных положений методики технико-экономической эффективности комплекса инженерных мероприятий по защите г. Ленинграда от наводнений», ответственным исполнителем которой был П.П. Долгов. Обе работы получили высокую оценку от организаций заказчика.

По договору между Ленгидропроектом и ЛПИ им. М.И. Калинина от 15 октября 1972 года на кафедре «Водные пути и порты» была выполнена работа на тему «Комплексные исследования судопропускных сооружений проекта защиты г. Ленинграда от наводнений». Научный руководитель темы — Г.В. Симаков, ответственный исполнитель — К.Н. Шхинек, исполнители — А.В. Головин, Ф.Н. Духовской, В.В. Жеденев, Т.Н. Колечиц, Д.В. Марченко, П.И. Смирнов.

В задачу исследований входило:

1) составление обзора существующих компоновочных и конструктивных решений морских и речных судопропускных сооружений, а также методов расчета взаимодействия плавающих средств с преградами;

2) определение лабораторным путем кинематических и динамических параметров процесса взаимодействия судов с преградами при волнении, ветре и течении воды;

3) определение потребной ширины судопропускных ворот при заданных габаритах судов;

4) установление параметров судопропускных сооружений, обеспечивающих безаварийный пропуск плавающих средств.

Кроме того, особой задачей была разработка методики расчета прочности железобетонных наплавных элементов при строительстве судо- и водопропускных сооружений. Требовалось провести расчетно-теоретическое обоснование отдельных вопросов по проекту производства работ, а именно по строительству, буксировке и установке наплавных железобетонных конструкций.

Весь цикл научных исследований был завершен в 1976 году. Все четыре года, пока велись эксперименты в волновом лотке, в опытах принимали участие почти все сотрудники кафедры и многие студенты старших курсов, обучавшиеся на кафедре «Водные пути и порты».

Под руководством Г.В. Симакова в лаборатории кафедры «Водные пути и порты» был создан бассейн, позволявший имитировать различные аварийные ситуации. Руководил работами Д.В. Марченко. Одной из первых в гидротехнической практике А.С. Большевым (ныне профессор, доктор технических наук) была разработана система автоматизации проведения опытов, включающая методы управления дви-

жением модели, синхронную регистрацию параметров ее движения и усилий, действующих на модель сооружения. Большой коллектив сотрудников кафедры разработал методику моделирования и провел детальные эксперименты. Результаты экспериментов позволили выявить основные закономерности, сопровождающие соударения судов с преградами.

Однако для уверенного воплощения этих результатов в жизнь требовалось теоретическое рассмотрение проблемы, поскольку существовавшие методики и нормативные документы не позволяли рассмотреть все возможные ситуации. С этой целью К.Н. Шхинеком был получен ряд теоретических решений. Им же впервые на кафедре был внедрен метод математического моделирования физических процессов. Сопоставление результатов проведенных численных и физических экспериментов показало их удовлетворительное согласование, что позволило сократить количество лабораторных опытов и дать надежные рекомендации для практики. Результаты работы были представлены монографией Г.В. Симакова, К.Н. Шхинека и Д.В. Марченко «Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия судов с преградами», изданной Ленинградским государственным университетом в 1979 году.

Сложные проблемы, связанные с системой защитных сооружений, были рассмотрены в цикле работ кафедры «Гидротехническое строительство» в 2006–2011 гг. Они касались работы уникальных плавучих затворов на судоходном сооружении С-1.

Эти затворы имеют сложную конструкцию, поэтому следовало разработать методику по управлению ими в чрезвычайных условиях, когда начинается наводнение. Исследования велись по заданию ОАО ЦКБ МТ «Рубин». Руководство работами со стороны Санкт-Петербургского государственного политехнического университета осуществлял А.С. Большев. Для решения этой задачи им была создана группа на базе кафедры ГТС с привлечением научных групп кафедры «Сопротивление материалов» инженерно-строительного факультета и лаборатории прикладной математики и механики физико-механического факультета.

Плавучий затвор судопропускного сооружения С-1 предназначен для перекрытия в случае угрозы наводнения основного судоходного канала в комплексе защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. Основной судоходный канал имеет ширину пролета 200 метров и глубину более 16 метров. Каждая створка состоит из сегментного батопорта, перекрывающего половину сечения канала, и опорной рамы, соединяющей створку через шарнир с береговым устоем. В период между наводнениями батопорты находятся в сухих доковых камерах, расположенных по бокам канала. При необходимости перекрытия судоходного канала доковые камеры заполняются водой, и батопорты, имеющие в своем составе отсеки плавучести, всплывают, обеспечивая такое положение створки на плаву, которое гарантирует ее безопасный вывод в канал. Для вывода створки из доковой камеры и последующего заведения используется специальный тягач, который передвигается по рельсовым путям и соединен с батопортом шарнирно закрепленной штангой. После вывода створок в пролет судоходного канала в балластные цистерны батопортов подается насосами вода, батопорты погружаются до порога канала и перекрывают его сечение, преграждая проход нагонной волны из акватории Финского залива в Невскую губу. Протяженность наружного борта батопорта составляет более 120 метров, высота — более 22 метров.

При возобновлении проектирования затвора С-1 на начальных стадиях работ с привлечением западных экспертов, имеющих опыт создания аналогичного затвора в Нидерландах, было определено, что проект затвора, разработанный в конце 90-х годов прошлого столетия, требует доработки:

необходимо повышение устойчивости батопортов в потоке воды, вызванном перепадом уровней;

требуется исследование динамики посадки батопортов на порог для уточнения приемлемых скоростей посадки и ускорений батопорта при касании опор;

необходима разработка новой системы мягкой посадки, основанной на использовании гидравлических демпферов, которые в качестве рабочей жидкости используют забортную воду.

В рамках экспериментов на физической модели, выполненных во ВНИИГ им. Б.Е. Веде-

неева, были изучены важнейшие аспекты, связанные с поведением батопорта под действием внешних нагрузок. Однако исследовать на пространственной физической модели одновременно все явления, влияющие на процесс посадки батопортов на порог, не представлялось возможным. В этой связи для анализа поведения батопортов в процессе перекрытия судоходного канала и отработки алгоритмов посадки батопортов на порог в СПбГПУ была создана математическая модель его поведения, позволяющая изучать поведение створок батопорта на всех фазах его работы. В математическую модель были интегрированы результаты экспериментальных исследований ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, а также исследования, выполненные учеными СПбГПУ.

В частности, на кафедре «Сопротивление материалов» были испытаны образцы упругих элементов и получены их характеристики. С их использованием в ОАО ЦКБ «Рубин» был сконструирован демпфер, на который опирается кормовая оконечность батопортов.

На кафедре ГТС была разработана математическая модель гидравлических демпферов в виде перфорированного цилиндра с подвижным штоком. С помощью групп демпферов, установленных в носовой и кормовой части батопортов, осуществлялось его торможение при приближении к дну. Для проверки математической модели работы этих демпферов и окончательной настройки их параметров под руководством специалистов СПбГПУ были выполнены испытания опытного образца демпфера на экспериментальной площадке полигона филиала ОАО «26 ЦНИИ».

В лаборатории прикладной математики и механики СПбГПУ была проведена серия исследовательских работ по математическому моделированию обтекания батопорта вязкой жидкостью. Задача решалась средствами вычислительной гидродинамики. Проведенные исследования позволили выявить, что причина возникновения колебаний створок батопорта — сход турбулентных вихрей с нижней створки батопорта. На некоторых режимах сход вихрей синхронизируется с колебаниями створок, способствуя дальнейшему увеличению амплитуды колебаний. После модификации конструкции батопорта данный эффект был существенно снижен, что также подтвердили расчеты. При заглублении батопорта крупные вихри, сходящие с нижней кромки, дробятся на более мелкие, которые уже не представляют угрозы безопасности конструкции.

В 2007–2008 годах эта работа была поддержана грантом корпорации Microsoft в рамках программы Technical Computing Initiative (TCI).

Выполненные численные и экспериментальные исследования позволили создать модель поведения плавучего затвора, с помощью которой последовательно были изучены все режимы его работы, синтезированы режимы управления батопортами и обеспечены предпосылки для безопасной эксплуатации судопропускного сооружения.

Проведенные исследования не только позволили завершить проектирование затвора, но, самое главное, позволили использовать для строительства затвора ранее изготовленные секции корпуса батопорта. Это дало существенную экономию времени на создание затвора, а также сэкономило государственному бюджету большие средства, которые дополнительно пришлось бы потратить, если бы не было найдено техническое решение по повышению устойчивости батопортов в потоке воды за счет установки дополнительных элементов (дополнительные отсеки плавучести и насосные блоки). Работоспособность батопорта и правильность принятых технических решений отчасти были продемонстрированы при наводнениях 2011 года, которые подтвердили, что вывод и посадка батопортов в потоке воды от перепадов уровней происходили устойчиво и амплитуды вертикальных колебаний батопортов при этом не превышали расчетных и экспериментальных значений.

Во второй половине 80-х годов прошлого века в средствах массовой информации города появились выступления противников реализации проекта защитных сооружений от наводнений. Наибольшую активность проявляли те, кто выступал за неприкосновенность природной среды. Их называли «зелеными». Возмутители стали апеллировать к мировому сообществу. Зарубежные специалисты в области гидротехнического строительства были также удивлены поворотом событий. Примером обеспокоенности может служить случай, произошедший с ав-

тором этой статьи. Когда я был в служебной командировке в г. Грац (Австрия), ко мне обратились с просьбой провести семинар в Техническом университете и рассказать о проекте и ходе строительства комплекса защитных сооружений Ленинграда от наводнений. После доклада состоялось детальное обсуждение и была высказана высокая оценка осуществляемого проекта. К такому же выводу пришла позже и международная группа экспертов.

На завершающей стадии строительства КЗС (2007–2009 годы) к выполнению работ по гидравлическим приводам затворов водопропускных сооружений подключились инженеры-механики с механико-машиностроительного факультета. Под руководством профессора доктора технических наук А.В. Ащеулова выполнялись проектные и производственные заказы подрядных организаций ОАО «Трест Спецгидроэнергомонтаж» (Санкт-Петербург) и ОАО «Трест Гидромонтаж» (Москва) на различных этапах изготовления и монтажа гидравлического оборудования. Очень важными и ответственными были работы по ревизии гидравлического оборудования сооружений В3–В6, находившегося в эксплуатации в период 1986–2004 годов, и гидравлического оборудования сооружений В1, В2, которое в свое время не было смонтировано и почти двадцать лет хранилось на складах. На основе требований современных стандартов были составлены акты состояния оборудования, по которым государственная комиссия приняла решение об использовании в приводах механизмов новых насосных агрегатов и гидравлических блоков управления. Реновации и продлению сроков эксплуатации подверглись гидроцилиндры, гидравлические баки и магистральные трубопроводы в галереях сооружений. Следует отметить уникальность гидравлических приводов механизмов затворов водопропускных сооружений: шесть сооружений, расположенных на протяженности 40 км дамбы; 64 затвора, управляемые с одного центрального пульта; 128 гидроцилиндров (диаметр поршня — 400 мм, диаметр штока — 180 мм, ход поршня для глубоководного затвора — 7300 мм, ход поршня для мелководного затвора — 4300 мм); 10 км трубопроводов; 6 гидравлических баков каждый емкостью 10 тонн; 90 тонн гидравлического масла; 950 кВт установочной мощности. Если сравнивать с другими городскими гидротехническими сооружениями, то по составу гидроприводов водопропускные сооружения КЗС составляют 16 мостов Александра Невского или 32 Троицких моста.

Несмотря на зарубежную поставку (из Сербии) новых гидравлических насосных агрегатов, гидравлических блоков управления, во время монтажа гидрооборудования возникало большое количество технических вопросов по стыковке этого гидрооборудования с сохраненными гидроцилиндрами и трубопроводами. Эти вопросы доверили решать инженерам Политехнического. На основе анализа конструкционной документации проектов СКБ «Ленгидросталь» 1982 года и 2008 года (совместного с сербской фирмой ППТ-Инжиниринг) были откорректированы принципиальные гидравлические схемы, составлены ведомости комплектующих по отклонениям. Особенно ценными были работы, основанные на интегрированных знаниях российского и зарубежного гидрооборудования, а также российских и зарубежных стандартов, которые отличаются друг от друга. По разработанной документации в очень сжатые сроки были изготовлены и поставлены недостающие комплектующие. Таким образом, благодаря участию наших инженеров-механиков был выдержан общий срок монтажных работ гидравлического оборудования.

Пусконаладочные работы гидросистем затворов водопропускных сооружений также проходили с активным участием инженеров-механиков СПбГПУ. Ими выполнены конструкторские проекты промывки и опрессовки трубопроводов. Затем они принимали непосредственное участие в реализации этих проектов, участвовали в испытаниях и анализе причин некорректной работы гидроприводов подхватов затворов, причин вибраций механизмов при подъеме затворов и решали другие технические вопросы, которые на стадии пуско-наладки возникают в большом количестве и требуют привлечения специалистов с научным потенциалом. В частности, благодаря наличию у наших механиков современного прибора (стандарт ISO) по оценке чистоты рабочей жидкости гидравлического масла, именно политехники выполняли независимую экспертную оценку чистоты гидравлических магистралей. Это очень важная

и ответственная работа, так как именно чистота рабочей жидкости в 75 % случаев влияет на отказы гидравлических механизмов и в этой связи будет напрямую оказывать влияние на безотказную работу водопропускных затворов и эффективность КЗС.

Отличительная особенность гидравлических приводов водопропускных затворов — необходимость синхронного движения гидроцилиндров. Из-за нежесткой металлоконструкции затворов возможны их перекосы и заклинивания в направляющих. Допустимые отклонения по перемещению гидроцилиндров не должны превышать 50 мм. При затворах длиной 24 м, по краям которых установлены гидроцилиндры с разным объемным КПД, и несимметричной разводке трубопровода задача синхронизации представлялось весьма сложной, тем более что нужно было использовать гидроцилиндры старых конструкций. Именно специалисты механико-машиностроительного факультета еще на стадии ревизии оборудования предложили установить на корпус гидроцилиндров современные датчики линейных перемещений (по типу оптических прицелов, устанавливаемых на ствол ружья). Это предложение было включено в качестве требования в техническое задание на проектирование и поставку гидрооборудования. Правда, реализация этого решения в очередной раз досталась иностранцам. Русским инженерам, к сожалению, начальство начинает доверять только тогда, когда что-то не получается у иностранцев, когда нужно выручать и спасать Родину.

По-настоящему героический случай произошел на другом объекте КЗС— на судопропускном сооружении С2. Гидропривод подъема-опускания плоского затвора в полном объеме еще не был смонтирован, установлены были только гидроцилиндры, без насосов и блоков управления. Требовалось опустить затвор весом 2500 тонн из строительного положения в рабочее, т. е. «затопить» затвор. Опустить на 24 м металлоконструкцию таких размеров без привода, под собственным весом, без перекосов, не уронить и не допустить заклинивание — чрезвычайно сложная техническая задача. Иностранная фирма-поставщик гидрооборудования предложила выполнить эти работы за три месяца, что не устраивало строителей. Подрядная организация ОАО «Трест Спецгидроэнергомонтаж» обратилась за помощью в Политехнический (кстати, руководители этого треста являются выпускниками нашего университета). Инженеры-механики за две недели не только разработали конструкторский проект и выполнили соответствующие расчеты, но и реализовали временную схему гидропривода на объекте и вместе со специалистами треста выполнили опускание и затопление затвора. Работы по опусканию проходили непрерывно в течение 16 часов и успешно были завершены в 4 часа утра 4 марта 2008 года. Температура воздуха была отрицательная, около –5 градусов, дул балтийский ветер. Люди работали на открытом воздухе и не могли покинуть свои посты, так как непрерывно вели визуальный контроль за изменением параметров процессов движения четырех гидроцилиндров (по два гидроцилиндра на каждом берегу), передавая друг другу информацию по рации. Сейчас эти работы кажутся просто нереальными. Но они были выполнены благодаря опыту, профессионализму и уверенности специалистов. Это был настоящий подвиг и хороший производственный подарок Президенту от петербургских строителей-гидротехников, и в нем был существенный вклад наших политехников, среди которых хочется особенно отметить конструктора 1-й категории НИЛ «Гидропривод» О.Н. Шалаеву, научного сотрудника НИЛ «Гидропривод» Д.А. Солодкова, заведующего лабораторией кафедры гибких автоматизированных комплексов С.Н. Изюмова, старшего преподавателя кафедры управления конструкторско-технологическими инновациями Е.Е. Харламову.

Инженеры-механики продолжают выполнять работы на КЗС и в настоящее время. Уже после ввода в эксплуатацию дамбы не оправдали себя электромеханические приводы подхватов затвора судопропускного сооружения С2. Они работают нестабильно, их подклинивает, что может привести к отказу сооружения. В настоящее время в Политехническом разрабатывается конструкторская документация по гидроприводу возвратно-поступательного движения для перемещения подхватов 2×1350 т. Кроме того, факультативно выполняются расчетные

исследования безотказности гидравлических приводов затворов водопропускных и судопропускных сооружений.

Но, наверное, самый главный вклад СПбГПУ в строительство КЗС заключается, как всегда, в подготовке кадров, которые руководили производственными процессами строительства и продолжают работать в настоящее время в дирекции КЗС.

За обсуждение и помощь в сборе материалов благодарю профессоров А.В. Ащеулова, К.Н. Шхинека, инженера В.И. Щекачихина, директора Фундаментальной библиотеки СПбГПУ Е.В. Дементьеву.

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — *доктор технических наук, профессор*, *президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*, *действительный член РАН*, *Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации*.
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-62-40

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 378.1

Р.В. Дегтярева

РЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ В ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

R.V. Degtyareva

THE RESTRUCTURING OF THE POLYTECHNIC UNIVERSITY

Статья посвящена реорганизации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, изменению структуры управления вузом, созданию базовых структурных учебных подразделений-институтов.

УНИВЕРСИТЕТ. РЕОРГАНИЗАЦИЯ. СТРУКТУРА. ИНСТИТУТЫ. ОТДЕЛЕНИЯ. УЧЕНЫЕ СОВЕТЫ.

Article is devoted to the reorganization of the St. Petersburg State Polytechnic University, the structure of management of high school. The creation of basic structural divisions-training institutions.

UNIVERSITY. REORGANIZATION. STRUCTURE. INSTITUTE. DEPARTMENT. THE SCIENTIFIC COUNCIL.

В первом десятилетии XXI века в России происходят принципиальные изменения в рамках реформы высшего образования, которая проводится с выделением ведущих вузов, оценкой эффективности вузов, сокращением на 20 % числа вузов в соответствии с Указом Президента России от 7 мая 2012 г. № 599 «О мерах по реализации государственной политики в области образования и науки», Федеральным законом № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», принятым Государственной Думой и подписанным Президентом РФ В.В. Путиным 29 декабря 2012 года, Приказом Минобрнауки РФ № 583 от 3.08.2012 «О проведении мониторинга деятельности ФГОУ ВПО».

Реформа высшего образования связана с изменением структуры экономики страны. Изменились масштабы машиностроения и металлургии, технологии в электронике, появились новые области деятельности в информационной сфере, интеллектуальном обеспечении техники, бытовой технике, иным стал уровень инженерного обеспечения в медицинском мониторинге и лечении, появились новые материалы и технологии изготовления конструкций. Развилась система компьютерных наук, значительно выросла роль интеллектуальной техники. За пять последних лет появились новая система сотовой связи, платежная безналичная система, мощные персональные компьютеры у каждого, изменились условия работы в цехах, в проектных подразделениях. Существенно выросла степень кооперации предприятий при изготовлении сложной продукции. Изменилась структура кадров в стране, в том числе в Санкт-Петербурге.

Принципиально изменились системы материальных потоков между странами и регионами, продаж, международной кооперации. Все это изменило структуру потребности в кадрах высшей квалификации и масштаб этой потребности. Изменились условия деятельности вузов.

С инициативой о реорганизации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета на заседании Ученого совета вуза выступил ректор — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН А.И. Рудской. В своем выступлении он подчеркнул, что «правительственные решения в сфере высшего образования ориентируют нас на решение стратегических задач, реализацию конкретных действий в вузах. Выделяются два пути в решении проблем:

можно ничего не делать и объективно «расползаться», сохраняя запаздывание и тяжеловесность;

во втором случае кто-то должен взять ответственность на себя, принимать принципиальные решения, концентрировать ресурсы на конкрет-

ных направлениях и задачах. Второе — сложнее, с большим риском, с ошибками, но это стратегия прогресса.

Если мы хотим быть лучшими, то надо отличаться от других. Если делать как все, то в лидеры не выйдешь.

Ожидания руководства страны, руководства системой образования ориентированы на действия ведущих вузов страны, которые должны стать локомотивами оздоровления системы высшего образования».

Инициатива А.И. Рудского была поддержана Ученым советом университета. Члены совета исходили из того, что внутри нашего вуза последние двадцать лет непрерывно шли адаптационные изменения в учебном процессе (целенаправленные, случайные, субъективные и объективные). Они были связаны в ряде случаев даже с необходимостью «выживания», откликом на внешние запросы. Реализация изменений сопровождалась наращиванием подразделений.

Ответственность системы высшего образования за обеспечение качественными и высококвалифицированными инженерными и научными кадрами потребовала ревизию внутренней деятельности Политехнического университета. С докладом «Об изменении структуры СПбГПУ» на заседании Ученого совета выступил проректор по организационной и экономической политике СПбГПУ доктор экономических наук профессор В.В. Глухов.

На основании поставленных государственных задач каждый российский вуз, считающий себя ведущим, должен изыскать систему действий, обеспечивающих выполнение указаний Президента страны, приказов Учредителя — Министерства образования и науки Российской Федерации, а также ожиданий работодателей.

Концепция реструктуризации Политехнического университета — образование в СПбГПУ крупных структур в форме институтов, ориентированных на ключевые направления развития экономики страны, с высокой степенью самостоятельности в управлении, представляющих собой крупные научные школы, претендующих на лидирующие позиции в российской и международной системе высшего образования, ориентированных на универсальный фундамент знаний.

Цель структуризации — повысить эффективность деятельности вуза через решение следующих задач: создание структур с высоким научным и образовательным потенциалом; концентрацию кафедр одного или близких по содержанию подготовки направлений; повышение престижности направлений подготовки выпускников; повышение привлекательности контактов с университетом со стороны предприятий и научных институтов; упрощение внутренних процедур управления; сокращение трудоемкости управления учебно-методическим процессом; выравнивание масштаба управляемых подразделений; приведение в соответствие численности работающих (ППС и УВП) с численностью обучаемых и объемом выполняемой учебной нагрузки.

Основная структурная единица университета — институт, который возглавляет директор, назначаемый приказом ректора. По согласованию с Ученым советом ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» директорами приказом ректора от 1 февраля 2013 года (№ 88) назначены:

ВАТИН Николай Иванович — «Инженерно-строительный институт»;

ЗАБЕЛИН Николай Алексеевич — «Институт энергетики и транспортных систем»;

РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович — «Институт металлургии, машиностроения и транспорта»;

МАКАРОВ Сергей Борисович — «Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций»;

ЧЕРНОРУЦКИЙ Игорь Георгиевич — «Институт информационных технологий и управления»;

БЕЛЯЕВ Александр Константинович — «Институт прикладной математики и механики»;

НЕКРАСОВА Татьяна Петровна — «Инженерно-экономический институт»;

ТИМЕРМАНИС Игорь Евгеньевич — «Институт гуманитарного образования»;

СИЛЬНИКОВ Михаил Владимирович — «Институт военно-технического образования и безопасности»;

АКОПОВА Мария Алексеевна — «Институт прикладной лингвистики»;

ДОЛГОПОЛОВ Владимир Анатольевич — «Институт международных образовательных программ»;

АФАНАСЬЕВ Михаил Владимирович — «Институт машиностроения (ЛМЗ — ВТУЗ)»;

ЛОПАТИН Михаил Владимирович — «Университетский политехнический колледж».

Институт обеспечивает все виды и уровни учебной подготовки (очная, очно-заочная, заочная) по профильным направлениям, повышение квалификации и профессиональную переподготовку; осуществляет научную, инновационную, и международную деятельность.

В каждом институте по направлениям подготовки выделяется базовая кафедра по международной деятельности, где предусмотрен повышенный объем преподавания иностранного языка, в том числе целых предметов на иностранном языке, зарубежные стажировки.

Институты специализируются на профильных дисциплинах и обеспечивают политехнический принцип образования.

Базовым структурным подразделением института и университета в целом является кафедра. Кафедры могут быть выпускающие и не выпускающие общеуниверситетской или общеинститутской фундаментальной подготовки. Возглавляется кафедра заведующим, избираемым по конкурсу согласно действующему Положению. При кафедрах могут быть лаборатории, центры.

Приказом ректора от 31 января 2013 (№ 73) года утвержден следующий перечень кафедр при институтах:

Инженерно-строительный институт

«Водохозяйственное и гидротехническое строительство»;

«Гражданское строительство и прикладная экология»;

«Строительство уникальных зданий и сооружений»;

«Строительная механика и строительные конструкции»;

«Сопротивление материалов»;

«Гидравлика».

Институт энергетики и транспортных систем

Электромеханическое отделение

«Электрические станции и автоматизация энергетических систем»;

«Электрические системы и сети»;

«Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»;

«Электрические машины»;

«Электротехника и электроэнергетика»;

«Теоретические основы электротехники».

Энергомашиностроительное отделение

«Атомная и тепловая энергетика»;

«Турбины, гидромашины и авиационные двигатели»;

«Реакторы, парогенераторы и котельные установки»;

«Компрессорная, вакуумная и холодильная техника»;

«Двигатели, автомобили и гусеничные машины»;

«Теоретические основы теплотехники».

Институт металлургии, машиностроения и транспорта

«Машиноведение и основы конструирования»;

«Теория механизмов и машин»;

«Общая и неорганическая химия»;

«Технология конструкционных материалов и материаловедение»;

«Инженерная графика и дизайн».

Отделение технологий материалов

«Металлургические технологии»;

«Технология и исследование материалов»;

«Сварка и лазерные технологии»;

«Физико-химия и технологии микросистемной техники»;

«Материалы, технологии и оборудование литейного производства»;

«Функциональные материалы и технологии».

Отделение технологий машиностроения

«Технология машиностроения»;

«Станкостроение»;

«Машины и технология обработки металлов давлением»;

«Транспортные и технологические системы»;

«Конструкторско-технологические инновации»;

«Компьютерные технологии в машиностроении»;

«Автоматы»;

«Мехатроника и роботостроение» (при ЦНИИ РТК).

Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

Отделение физики и нанотехнологий

«Физика плазмы»;

«Космические исследования»;

«Физика и технология наноструктур»;
«Экспериментальная ядерная физика»;
«Экспериментальная физика»;
«Теоретическая физика»;
«Биофизика».

Отделение электроники и телекоммуникаций

«Квантовая электроника»;
«Физика полупроводников и наноэлектроники»;
«Радиофизика»;
«Физическая электроника»;
«Радиотехника и телекоммуникации»;
«Радиоэлектронные средства защиты информации»;
«Интегральная электроника».

Отделение медицинской физики и биоинженерии

«Физико-химические основы медицины, биотехнология и реабилитационные биотехнические системы»;
«Физико-химическая биология клетки и медицинские технологии».

Институт информационных технологий и управления

«Компьютерные системы и программные технологии»;
«Распределенные вычисления и компьютерные сети»;
«Измерительные информационные технологии»;
«Информационные и управляющие системы»;
«Компьютерные интеллектуальные технологии»;
«Системы и технологии управления»;
«Системный анализ и управление»;
«Интеллектуальные системы автоматизации»;
«Корабельные информационно-управляющие системы»;
«Управление проектами»;
«Информационная безопасность компьютерных систем».

Институт прикладной математики и механики

«Прикладная математика»;
«Механика и процессы управления»;
«Гидроаэродинамика»;
«Высшая математика»;
«Теоретическая механика»;
«Математическая физика»;
«Телематика» (при ЦНИИ РТК).

Инженерно-экономический институт

Отделение экономики и менеджмента

«Экономика и менеджмент в машиностроении»;
«Экономика и менеджмент недвижимости и технологий»;
«Экономика и менеджмент в энергетике и природопользовании»;
«Стратегический менеджмент»;
«Информационные системы в экономике и менеджменте»;
«Предпринимательство и коммерция»;
«Мировая и региональная экономика»;
«Финансы и денежное обращение».

Отделение «Международная высшая школа управления»

«Международный бизнес»;
«Международные экономические отношения».

Отделение государственного и муниципального управления

«Управление в социально-экономических системах»;
«Национальная безопасность».

Институт гуманитарного образования

Отделение гуманитарного образования

«Инженерная педагогика и психология»;
«Социально-политические технологии»;
«Политическая экономия»;
«Философия»;
«История»;
«Физическое воспитание».

Отделение юриспруденции

«Теория и история государства и права»;
«Уголовное право и криминология»;
«Конституционное и муниципальное право»;
«Гражданское и международное право».

Институт военно-технического образования и безопасности

«Управление и защита в чрезвычайных ситуациях»;

«Безопасность жизнедеятельности»;

«Экстремальные процессы в материалах и взрывобезопасность».

Факультет военного обучения

кафедра автомобильных войск;
кафедра военно-воздушных сил;
кафедра связи.

Институт прикладной лингвистики

«Лингводидактика и перевод»;

«Лингвистика и межкультурная коммуникация»;

«Английский язык для технических направлений»;

«Английский язык для физико-математических направлений»;

«Романо-германские языки»;

«Русский язык».

Институт международных образовательных программ

Отделение международных отношений

«Международные отношения»;

«Управление международным сотрудничеством»

Отделение базовой подготовки иностранных граждан

«Математика и естественно-научные дисциплины»;

Главы институтов в составе СПбГПУ:

1 ряд — директор института прикладной лингвистики М.А. Акопова, ректор СПбГПУ А.И. Рудской, директор инженерно-экономического института Т.И. Некрасова;

2 ряд — директор института металлургии, машиностроения и транспорта М.М. Радкевич, директор института прикладной математики и механики А.К. Беляев, директор института энергетики и транспортных систем Н.А. Забелин, директор инженерно-строительного института Н.И. Ватин, директор института военно-технического образования и безопасности М.В. Сильников, директор института информационных технологий И.Г. Черноруцкий, директор института машиностроения «ЛМЗ — ВТУЗ» М.В. Афанасьев

«Русский язык как иностранный»;

«Физическая культура и адаптация иностранных граждан».

Институт машиностроения «ЛМЗ-ВТУЗ»

«Технологические машины и оборудование автоматизированных производств»;

«Автоматизация технологических комплексов и процессов»;

«Оборудование и технологии производства металлоконструкций»;

«Экономика и менеджмент энергетического машиностроения»;

«Машины и оборудование энерготехнологических комплексов»

Университетский политехнический колледж «Радиополитехникум»

Естественно-научный лицей

По решению Ученого совета университета состоялись выборы ученых советов институтов, состав которых был утвержден Ученым советом СПбГПУ 26.01.2013 г.

Реструктуризация вуза потребовала разработки и принятия ряда новых Положений, касающихся структуры и деятельности ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», которые были предметом обсуждения на заседаниях Ученого совета, а именно:

об институте;

о научном руководителе института;

об ученом совете института;

о порядке замещения должностей профессорско-преподавательского состава;

об ученом совете университета;

о советах и комиссиях ученого совета.

Реструктуризация предполагает сохранение и развитие лучших элементов сложившейся системы, включая производственные практики, исследовательские элементы в обучении, участие в преподавании специалистов из промышленности и институтов РАН, конкретную ориентацию выпускных работ, хорошую фундаментальную подготовку. Все это — достижения Политехнического университета.

ДЕГТЯРЕВА Раиса Васильевна — *доктор исторических наук профессор, ученый секретарь Ученого совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-98-42

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 60:378.1

А.А. Попович

СТАНОВЛЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

A.A. Popovich

BECOMING OF THE JOINT SCIENCE AND TECHNOLOGY INSTITUTE

В статье описаны этапы становления Объединенного научно-технологического института. Институт образован в 2010 году в рамках программы развития СПбГПУ как национального исследовательского университета.

УНИВЕРСИТЕТ. ИНТЕГРАЦИЯ. НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ. КОМПЛЕКСНЫЕ ПРОЕКТЫ. ИННОВАЦИИ.

The article describes the stages of formation of the Joint Science and Technology Institute. The Insti-tute was founded in 2010 as part of of development SPbSPU as a national research university.

UNIVERSITY. INTEGRATION. SCIENTIFIC TECHNOLOGICAL. INTEGRATED PROJECTS. INNOVATION.

Получение нашим вузом статуса национального исследовательского университета (НИУ) стало началом для качественно новых организационных и структурных решений в научной и образовательной деятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ). Ключевая позиция реализации программы НИУ СПбГПУ — создание Объединенного научно-технологического института (ОНТИ).

К концу 2012 года деятельность ОНТИ была сконцентрирована на решении двух основных задач:

формировании научно-технологической базы ОНТИ с использованием высокотехнологичного оборудования и наукоемких технологий;

интеграции научной и прикладной деятельности подразделений ОНТИ и кафедр СПбГПУ.

На рис. 1 приведена структура подразделений ОНТИ, сложившаяся на начало 2013 года, основу которой составляют научно-технологические комплексы. В свою очередь, они совместно с кафедрами формируют команды исполнителей для крупных, совместно с промышленностью, проектов.

Формирование современной научно-технологической базы

Формирование современной научно-технологической базы ОНТИ ориентировалось на следующие направления: мультидисциплинарные исследования и надотраслевые наукоемкие комплексные технологии; материалы со специальными свойствами и нанотехнологии; энергетику, энергосберегающие и экологические технологии; информационные и телекоммуникационные технологии, интеллектуальные системы. Основной целью этой деятельности были поиски ниш на рынке производства высокотехнологичной продукции.

В течение трех лет динамика роста закупок научного и технологического оборудования для ОНТИ соответствовала динамике роста объема договорных работ. В целом за 2010–2012 годы было закуплено оборудования на общую сумму 350 млн руб., а общий объем договорных работ за этот промежуток времени составил 370 млн руб. (рис. 2).

В 2012 году были сформированы 7 основных научно-технологических комплексов в виде технологических линеек, в их числе:

прототипирование и аддитивные технологии;

структура и свойства материалов;

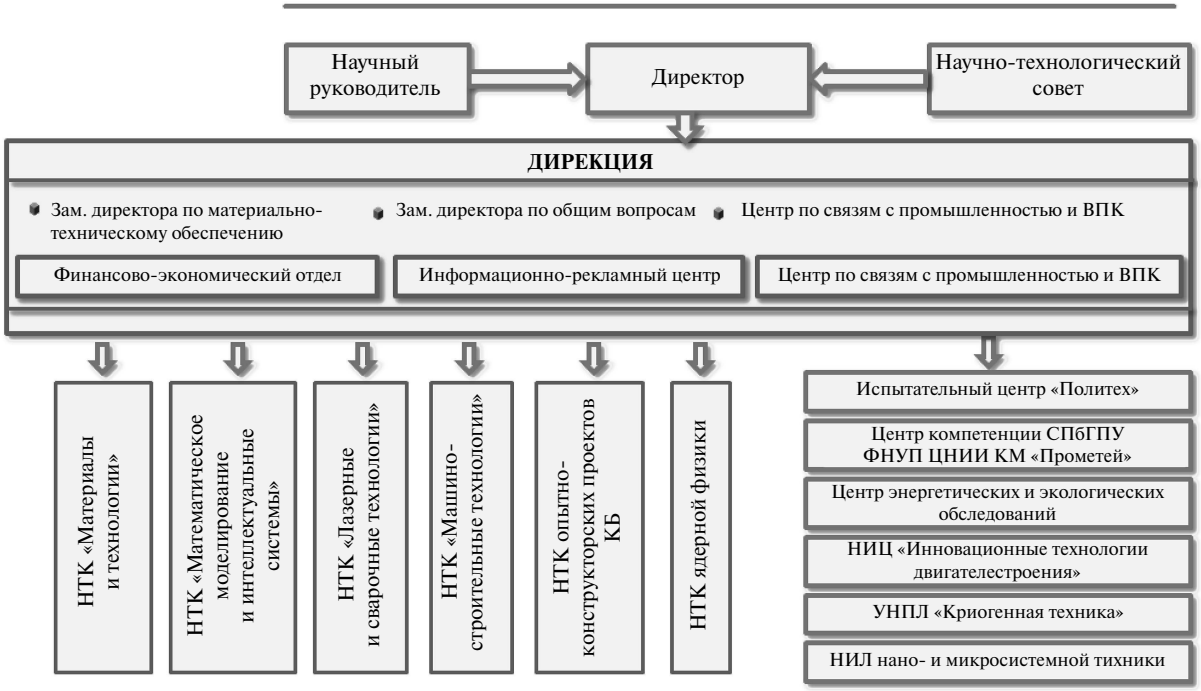


Рис. 1. Структура подразделений Объединенного научно-технологического института (приказ ректора № 87/1 от 01.02.2013 г.)

получение порошковых материалов;

получение литий-ионных аккумуляторов;

разработка наноматериалов и нанотехнологий;

энергоэкологический комплекс;

компьютерный инжиниринг.

Форирование технологических линеек позволило сконцентрировать научно-исследовательское и технологическое оборудование по приоритетным направлениям развития науки

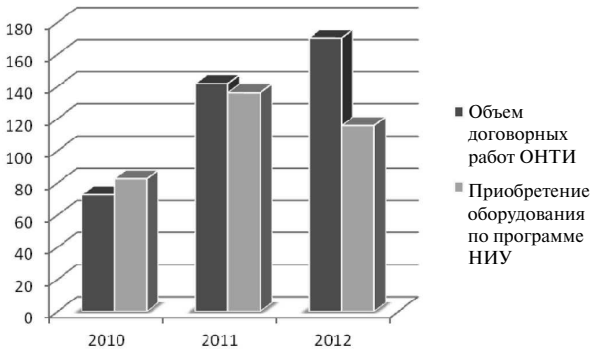


Рис. 2. Объем договорных работ ОНТИ и суммарная стоимость оборудования, приобретенного по программе НИУ (млн руб.)

РФ. Они стали своеобразными центрами коллективного пользования для реализации всей цепочки создания высокотехнологического продукта — от идеи до экспериментального образца.

К примеру, в октябре 2012 года была введена в эксплуатацию технологическая линейка «Прототипирование и аддитивные технологии». Технология работы следующая. Сначала рождается идея, которая формализуется в виде 3D модели, а затем с помощью прототипирования и аддитивных технологий в короткие сроки изготавливается высокотехнологичная продукция. Благодаря этому сокращается цикл освоения продукции, и тем самым создаются конкурентные преимущества. Такой научно-технологический комплекс пока единственный в России. Он прошел первую апробацию, когда по заказу ОАО Климова в течение месяца было изготовлено 1,2 тысячи восковых моделей турбинных лопаток сложной геометрической конфигурации для моделирования газовой турбины.

Реализация подобных заказов невозможна без привлечения высококвалифицированных молодых специалистов. В ОНТИ была разработана программа стажировки молодых специали-

стов в ведущих зарубежных компаниях. Десять человек прошли стажировку и получили международные сертификаты, позволяющие работать на новом оборудовании.

Для реализации НИР и ОКР по приоритетному направлению РФ «Индустрия наносистем» была создана технологическая линейка получения порошковых материалов, в том числе наноматериалов, и соответствующих нанотехнологий.

Данный комплекс позволяет осуществлять полный технологический цикл получения и контроля качества наноматериалов на самом современном оборудовании, часть из которого — единственное в России. Успешная апробация данной технологической линейки была реализована в международном комплексном проекте с Китайской Народной Республикой по разработке нового нанокомпозиционного катодного материала и изготовлению на его основе литий-ионного аккумулятора. В настоящий момент на базе данной технологии проводятся комплексные исследования по получению специальных материалов.

Технологическая линейка «Структура и свойства материалов» была скомпонована по требованиям ведущих российских и зарубежных компаний. Ее лаборатории имеют российские и международные сертификаты. На текущий момент ОНТИ — ведущая организация по механическим испытаниям для Газпрома.

Интеграция научной и прикладной деятельности подразделений ОНТИ и кафедр СПбГПУ

Ключевой деятельностью ОНТИ стала координация научных и прикладных работ подразделений ОНТИ и кафедр университета — ОНТИ выступил в качестве интегратора их комплексных проектов.

18 октября 2012 года было заключено соглашение между ОАО «Климов» и ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» о научно-техническом сотрудничестве в области создания и внедрения новых технологических решений для повышения эффективности работы авиационных двигателей и разработки двигателей нового поколения. Соглашение подписали ректор СПбГПУ член-корреспондент РАН Андрей Иванович Рудской и исполнительный директор ОАО «Климов» Александр Иванович Ватагин (рис. 3).

Рис. 3. Ректор СПбГПУ А.И.Рудской и исполнительный директор ОАО «Климов» А.И. Ватагин после подписания договора

В соответствии с Соглашением стороны планируют проводить совместные работы по созданию новых элементов двигателей для вертолетов и самолетов, разработку и производство перспективных материалов с новыми свойствами, современных систем управления двигателями на отечественной элементной базе. В проекте приняли участие три института ОНТИ — НИИ энергетики, НИИ материалов и технологий (НИИ МТ), НИИ электронных систем — в сотрудничестве с кафедрами «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника», «Турбинные двигатели и установки», «Радиоэлектронные средства защиты информации», «Пластическая обработка металлов».

Важной составляющей сотрудничества станет создание инновационных беспроводных технологий обмена данными между интеллектуальными устройствами, блоками управления и контроля силовых установок. При этом Соглашение подразумевает проведение полного спектра работ — от идеи до конечного продукта — по всем заявленным направлениям: расчет, конструирование, разработку, комплекс испытаний и верификацию результатов, т. е. создание современных образцов техники и технологий «под ключ».

Многоцелевые комплексные исследования проводились различными подразделениями ОНТИ по договорам с ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». В работе принимали участие коллективы НИИ МТ: лаборатория «Исследование и моде-

лирование структуры и свойств металлических материалов», лаборатория жидкофазных металлургических технологий, научно-исследовательский образовательный центр (НОЦ) «Везерфорд-Политехник», отделение «Компьютерные технологии проектирования и инженерного анализа», Испытательный центр «Политехтест», а также кафедры «Физика прочности и пластичности материалов», «Пластическая обработка металлов», «Исследование структуры и свойств материалов», «Предпринимательство и коммерция».

Общий объем работ с ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в 2012 году составил 12,5 млн руб. В ноябре 2012 года для выполнения актуальных и реальных наукоемких проектов на основе «проблемно/проектно-ориентированного подхода», принципов «гарантированной коммерциализации» и «заказных инноваций» в составе ОНТИ был создан Центр компетенции внедрения новых материалов и технологий ФГБОУ ВПО СПбГПУ и ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».

В приоритетном направлении развития «Энергетика, энергосберегающие и экологические технологии» наиболее существенная работа — «Разработка технологии и оборудования для очистки высокотоксичных жидких отходов в условиях их полигонного хранения» — в 2012 году выполнялась коллективом под руководством научного руководителя программы НИУ СПбГПУ академика РАН М.П. Федорова. Работа велась по заказу Минобрнауки, годовой объем 40,5 млн руб., суммарно — 99 млн руб. до июня 2013 года. Предлагаемый комплекс технологических и технических средств очистки высокотоксичных жидких отходов предназначен для утилизации высокотоксичных органических и минеральных примесей жидких отходов.

7 июля 2012 года СПбГПУ, инжиниринговая компания AVL List GmbH (Австрия) и ОАО «Звезда» подписали соглашение о создании Научно-исследовательского центра дизельного строения и трансмиссий (R&D Центр). Соглашение было подписано в ходе рабочей встречи губернатора Санкт-Петербурга Георгия Сергеевича Полтавченко с профессором Хельмутом Листом, председателем правления и генеральным директором AVL List GmbH, председателем Австрийско-Российского совета.

R&D Центр дизельного строения и трансмиссий, созданный в рамках соглашения между СПбГПУ, AVL и ОАО «Звезда», учрежден как малое инновационное предприятие. Основное направление деятельности Центра — разработка проектов по созданию новых размеров и типов двигателей и трансмиссий, гибридных силовых установок, модернизация существующих двигателей и технологий их производства, а также разработка конкурентоспособных экологически чистых транспортных средств. Со стороны СПбГПУ в проекте принимали участие НИЦ «Инновационные технологии двигателестроения» ОНТИ, кафедра двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

НИЦ «Инновационные технологии двигателестроения» ОНТИ ориентирован на работы по прорывным технологиям энергетического машиностроения в тесном контакте с российскими и зарубежными высокотехнологичными предприятиями. В настоящее время по заказу ОАО «Звезда» НИЦ выполняет поисковые и экспериментальные исследования, общая стоимость которых составляет 28 млн руб.

В 2012 году Минэкономразвития РФ утвердило перечень пилотных программ развития инновационных территориальных кластеров (ИТК), которые предполагается поддержать через предоставление субсидий из федерального бюджета. В Северо-Западном округе государство выделило два ИТК, в том числе радиологический кластер Санкт-Петербурга.

НИИ ядерной физики (НИИЯФ) ОНТИ входит в состав радиологического кластера Санкт-Петербурга с ноября 2010 года. В составе кластера — промышленные предприятия, научно-исследовательские институты и федеральные государственные университеты (рис. 4). НИИ ЯФ задействован как поставщик мишенных комплексов для серийного производства циклотронов.

Интеграция ОНТИ в международную инновационную систему осуществлялась путем организации совместных с ведущими зарубежными компаниями научных лабораторий и центров. Например, по направлению «Индустрия наносистем» была открыта Российско-Китайская лаборатория «Функциональные материалы». В результате создана технологическая линейка получения литий-ионных полимерных аккумуляторов с использованием нанокомпозицион-

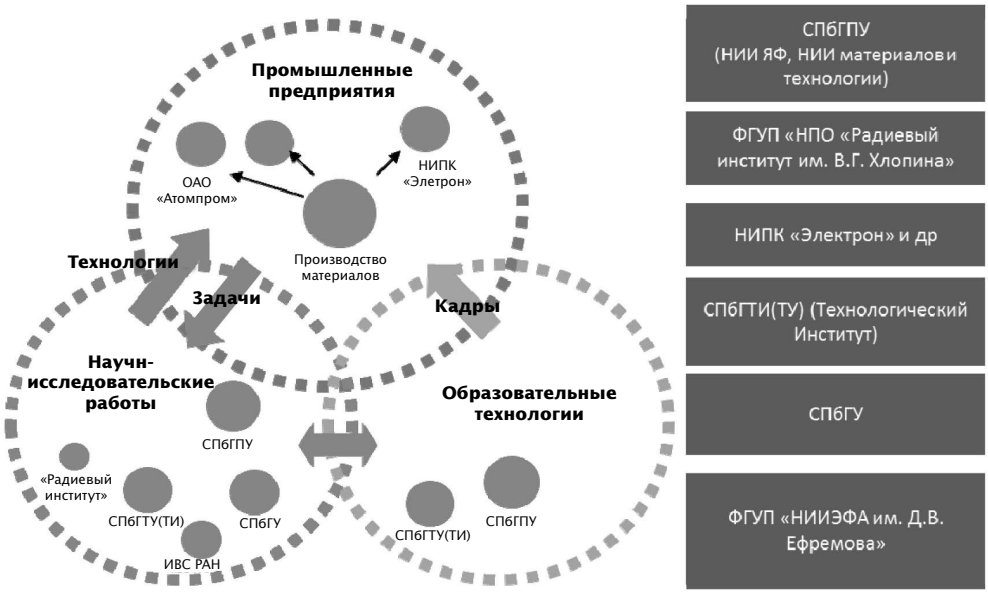


Рис. 4. Схема участия СПбГПУ в кластере радиационных и фармацевтических технологий

ных материалов. В проекте приняли участие подразделения ОНТИ — НИИМТ, НИИ энергетики и кафедры «Распределенные вычисления и компьютерные сети», «Исследование структуры и свойств материалов (ИСиСМ)».

Также был открыт международный технологический центр «Филипс-Политехник». При участии НИИМТ, НИИММИСУ, НИИ ядерной физики ОНТИ, института физики и нанотехнологий, института информационных технологий и управления создана технологическая линейка получения и исследования порошковых сцинтилляционных материалов. Реализованы проекты на общую сумму 4 млн руб.

В 2012 году были продолжены совместные с американской компанией «Везерфорд» работы по коррозионным испытаниям широкого класса материалов. НОЦ «Везерфорд-Политехник», входящий в состав ОНТИ, совместно с отделением компьютерного инжиниринга и кафедрой «Металлургия стали», реализовал проекты на общую сумму 16 млн руб.

Эффективность деятельности

Оценка эффективности деятельности ОНТИ за 2012 год осуществлялась по показателям и в сравнении с нормативами, принятыми в университете (см. табл.). Это показатели научно-инновационной деятельности, развития кадрового потенциала, международного признания и финансовой устойчивости. По всем четырем показателям эффективность деятельности ОНТИ соответствует основным показателям университета. Исключение — количество научно-педагогических работников, имеющих ученую степень, что объясняется значительной долей молодежи в ОНТИ.

Один из ключевых показателей эффективной деятельности ОНТИ — объем НИР и ОКР. В целом за 2012 год он равен 170 млн руб. Около половины НИОКР, выполненных подразделениями ОНТИ, составили работы для российских предприятий реального сектора экономики. При этом 14 % работ проводились совместно с зарубежными компаниями. Доля опытно-конструкторских и опытно-технологических работ подразделений ОНТИ — 40,9 %.

Перспективы

Долгосрочные перспективы развития ОНТИ связаны с реализацией крупных комплексных НИР и ОКР. Тематика этих работ соответствует направлениям научно-технологического развития страны, утвержденных государственной

программой развития РФ до 2020 года, и включает следующие направления работ:

разработку и подготовку к производству газового двигателя нового поколения;

разработку и внедрение новых композиционных материалов в машиностроение специализированных производств;

разработку и создание производства в РФ дизельных двигателей и их компонентов нового поколения;

разработку и подготовку серийного производства конкурентоспособного импортозаменяющего инструмента;

разработку и подготовку к производству накопителей энергии для систем автономного и резервного энергоснабжения;

разработку и внедрение новых порошковых высокоазотистых аустенитных сталей с нанокристаллической структурой;

разработку и внедрение высокотехнологичной продукции на основе микросистемной техники и беспроводных систем управления летательных аппаратов;

разработку и изготовление композиционных материалов нового поколения для элементов конструкций двигательных установок.

В краткосрочных перспективах развития ОНТИ — участие в ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России» до 2015 года, конкурсе по постановлению № 218, конкурсах Минпромторга совместно с ОАО «Звезда», а также выполнение ряда работ: по программе «Перспективные вертолетные двигатели» совместно с ОАО «Климов», по разработке технологии обработки титановых сплавов совместно с ЦНИИКМ «Прометей», по заказам предприятий ОАО «Газпром», с зарубежными партнерами (AVL, TSE, Weatherford, Philips).

Таблица 1

Показатели эффективности деятельности ОНТИ в 2012 году

Показатель	Норматив по СПбГПУ	Показатель по ОНТИ в 2012 г.
Показатели результативности научно-инновационной деятельности		
Число статей по ПНР НИУ в научной периодике, индексируемой Web of Science, Scopus и РИНЦ, в расчете на одного НПР	0,37	0,51
Доля ОКР по ПНР НИУ в общем объеме НИОКР НИУ	16,8 %	40,9 %
Число объектов интеллектуальной собственности по ПНР НИУ, поставленных на бухучет	3	3
Число научных публикаций в ведущих российских и зарубежных журналах на 100 НПР за год	5	11,3
Показатели развития кадрового потенциала		
Доля НПР и инженерно-технического персонала возрастных категорий от 30 до 49 лет	29,8 %	46,9 %
Доля НПР, имеющих ученую степень доктора наук или кандидата наук	68,5 %	13,7 %
Доля аспирантов и НПР, имеющих опыт работы (прошедших стажировки) в ведущих мировых научных и университетских центрах	2,4 %	4,8 %
Показатели международного признания		
Объем средств, привлеченных в рамках международного сотрудничества, в расчете на одного НПР	8 тыс.руб	68 тыс.руб
Показатели финансовой устойчивости		
Объем НИР, ОКР, выполненных за год	По СПбГПУ 713,4 млн руб	170,1 млн руб

В 2012 году в 11-м учебном корпусе был проведен ремонт помещений общей площадью 1600 кв. м для НИИ машиностроительных технологий, входящего в состав ОНТИ. Сегодня здесь проводится полный комплекс работ и услуг в области прототипирования и аддитивных технологий — от идеи до создания инновационного изделия, а также выпуск опытных образцов и мелкосерийной продукции.

В конце 2013 года будет завершено строительство нового научно-исследовательского корпуса (НИК), в связи с чем ОНТИ планирует обширную организационно-техническую деятельность по освоению НИК, формированию плана эффективного использования площадей, подготовке к размещению оборудования и сотрудников. В дальнейшем именно на этих двух площадках — в НИК и НТК «Машиностроительные технологии» — будут сконцентрированы передовые интеллектуальные и материальные ресурсы университета, а также будут решаться комплексные научно-технические задачи.

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич — *доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой технологии и исследования материалов, исполнительный директор ОНТИ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-98-29
popovicha@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 629.78

А.Б. Железняков, В.В. Кораблев

ОТ «АРИАБАДЫ» ДО ПОЛЕТА НА МАРС

A.B. Zheleznyakov, V.V. Korablev

FROM «ARIABADY» BEFORE THE FLIGHT TO MARS

Проанализированы основные этапы становления космических программ Индии. Особое внимание уделено современному состоянию индийской космической отрасли и тенденциям ее развития на ближайшие годы.

КОСМОС. ИНДИЯ. КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ. ОРБИТАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ. МАРС. РАКЕТНАЯ ТЕХНИКА.

Analyzed the main stages of formation of space programs of India. Of particular attention was paid present state the Indian space industry and its future developments and trends of the coming years.

SPACE. INDIA. SPACE COMMUNICATIONS SPACE STATIONS. MARS. MISSILE TECHNOLOGY.

В элитный клуб государств, собственными силами овладевших технологией запуска искусственных спутников Земли, Индия вошла в 1980 году, став седьмой* космической державой в мире.

Приблизительно такое же место индийская космонавтика занимает и сегодня, уступая признанным космическим лидерам (Россия, США и Китай), соперничая с Европой и Японией и значительно опережая других членов «Большого космического клуба» (Израиль, Иран, Северная и Южная Кореи).

По прогнозам экспертов, космонавтику Индии ждет большое будущее: пилотируемые корабли, полеты на Луну и Марс, экспедиции в дальний космос, космические аппараты прикладного назначения.

Как будут развиваться события на самом деле — покажет будущее. А пока о том, каким был путь индийцев в космос.

Из Китая в Европу через Индию

Ракеты появились в Индии две сотни лет назад, «придя» туда из Китая. Первые сведения о них и об их применении датируются 1792 годом, когда отряды под командованием султана Типпу выпустили по британским войскам в сражении при Саренгапатаме множество ракет.

Индийские боевые ракеты представляли собой железные трубы, привязанные к бамбуковым шестам-направляющим. Дальность их полета (стрельбы) составляла порядка километра.

Именно через Индию ракеты «проникли» в Европу. Свидетелем их применения в битве при Саренгапатаме оказался британский офицер Уильям Конгрив-старший (William Congreve, Sr.). Вернувшись домой, он рассказал об увиденном своему сыну, Уильяму Конгриву-младшему (William Congreve, Jr.). Рассказ настолько поразил молодого человека, что спустя несколько лет он «изобрел» знаменитые «ракеты Конгрива».

Внешне они мало чем отличались от тех, которые применялись войсками султана Типпу. Но были технологичней за счет использования современных (на тот момент, естественно) материалов. Почти в три раза увеличилась и дальность их стрельбы.

С 1806 года «ракеты Конгрива» достаточно активно применялись британской армией в различных войнах, в том числе и в самой Индии при подавлении многочисленных восстаний местного населения. Стояли они на вооружении и многих европейских стран — России, Пруссии, Нидерландов, Швеции, Сардинии, Саксонии и других.

* До Индии собственными средствами запуска спутников обзавелись СССР (в 1957 г.), США (1958), Франция (1965), Япония и Китай (1970) и Великобритания (1971).

Рождение индийской космонавтики

Космическими исследованиями в Индии занялись в 1947 году, сразу же после обретения страной независимости. Руководство этими работами было поручено созданному при индийском правительстве Департаменту космических исследований (Department of Space).

Основные положения первой космической программы Индии были сформулированы известным индийским физиком Викрамом Сарабхаи (Vikram Sarabhai), которого нередко называют «Циолковским Индии».

В те годы эта программа предполагала только разработку геофизических ракет, предназначенных для изучения верхних слоев земной атмосферы и космического излучения, а также исследование космического пространства с помощью наземных средств. О спутниках и межпланетных станциях не говорилось вовсе. Считалось, что это дело столь отдаленного будущего, о котором могут рассуждать только писатели-фантасты.

Однако в 1958 году, вскоре после запуска в Советском Союзе первого в мире искусственного спутника Земли, программа претерпела значительные изменения. По инициативе Сарабхаи в нее были включены пункты, предусматривающие разработку космических носителей и спутников, а также создание в Индии ракетно-космической промышленности.

Упор был сделан на решение практических задач социально-экономического развития страны: ликвидацию неграмотности через спутниковые образовательные программы, развитие связи, создание спутниковой службы прогноза погоды, формирование кадастра водных ресурсов и т. п.

Любопытно, что Индия — единственная космическая держава, где космические исследования изначально имели мирную направленность. Во всех остальных странах все начиналось с разработки боевых ракет, которые постепенно трансформировались в ракеты гражданского применения. В Индии же эти работы были разделены не только между разными ведомствами, но и между разными исполнителями, и шли параллельно. «Пересечение интересов» военных и гражданских специалистов произошло гораздо позже. Но это было уже следствием тех достижений, которых добились ученые и инженеры в освоении космоса.

Новым шагом в развитии космической программы Индии стало создание государственного космического агентства. До 1969 года оно носило официальное название Индийского национального комитета космических исследований (Indian National Committee for Space Research), а затем было переименовано в Индийскую организацию космических исследований (Indian Space Research Organization).

Результатом создания специализированной правительственной структуры, задачей которой являлась организация космических исследований, стало существенное увеличение финансирования проводимых работ, а также возможность привлечения к реализации национальных проектов ученых и специалистов из других стран, в первую очередь из США и Советского Союза, бывших на тот момент непререкаемыми лидерами в вопросах освоения космоса. Таким образом, Индия была намерена ликвидировать громадное техническое и технологическое отставание, которое она получило в наследство от Британской империи.

В начале 1960-х годов на западном побережье страны началось сооружение ракетного полигона Тумба. Именно оттуда 21 ноября 1963 года состоялся первый ракетный старт в истории современной Индии — была запущена американская геофизическая ракета «Найк-Апачи» (Nike-Apache), но с индийским оборудованием в головной части.

Как вспоминал один из ветеранов американского космического ведомства, присутствовавший на старте, они долго «ждали прибытия полезного груза и вдруг увидели парня, который ехал по проселочной дороге на велосипеде. Когда он приблизился, мы поняли, что груз находится на багажнике... Скрывая свое удивление, мы все-таки установили оборудование на ракету и отправили ее в полет».

В дальнейшие годы индийские специалисты приобретали опыт создания и обращения с ракетной техникой, предоставляя возможность зарубежным странам производить пуски геофизических ракет со своего полигона. В период до 1974 года из Тумбы было запущено более 350 ракет американского, советского, французского и английского производства. А спустя несколько лет оттуда стали стартовать ракеты и индийского производства.

Первая индийская твердотопливная ракета «Рохини RH-75» диаметром 75 миллиметров была изготовлена на базе шашки кордитного пороха звездообразного сечения. Ее первый пуск был произведен из Тумбы 20 ноября 1967 года на высоту 9 километров с полезной нагрузкой в 1 килограмм. Уже в следующем году ракета достигла своей проектной высоты полета — 75 километров.

За ней последовали ракеты RH-100, RH-125, RH-300, RH-560. Индекс в обозначении ракеты как раз и говорил о максимальной высоте подъема ее головной части.

В августе 1972 года были сформулированы основные положения новой космической программы. Ее лейтмотивом стала следующая мысль: «В космических областях для нас важно быть в курсе последних достижений и развиваться в ногу со временем, так как мы имеем возможность быть среди передовых стран мира в этой области. У нас есть людские ресурсы и сеть предприятий. Мы все еще должны полагаться на импорт готовых изделий, но нет причин, почему мы не должны нацеливаться на полную самостоятельность в космической технике. Сотрудничество с зарубежными странами должно всячески поощряться»...

Первые шаги в космос

Реализация новой космической программы началась немедленно.

Свой первый шаг в космос Индия сделала 19 апреля 1975 года, когда в Советском Союзе был запущен первый индийский спутник «Ариабхата-1» (Ariabhata-1).

Спутник массой 358 килограммов был предназначен для исследования ионосферы, регистрации нейтронного и гамма-излучения Солнца, рентгеновского излучения галактического происхождения и излучения ночного неба. Советские специалисты оказали помощь в создании записывающего устройства, некоторых электронных компонентов, солнечных и химических батарей. Прием информации с борта космического аппарата осуществлялся станциями на острове Шрихарикота (Индия), близ Москвы (СССР), в Тулузе (Франция) и в Куру (Французская Гвиана).

К разработке собственной ракеты-носителя легкого класса индийцы приступили в 1973 году. Возглавил работы Абдул Калам (Abdul Kalam)*, который, учась в США, получил доступ к техническим отчетам по проекту американского носителя «Скаут» (Scout). Вместе с ним работали и другие известные специалисты: В. Говарикет (V.R. Gowariket), М. Куруп (M.R. Kurup) и А. Мутхунаягам (A.E. Muthunayagam).

Ракета-носитель «Скаут» фактически стала прототипом первого индийского космического носителя SLV-3 (Satellite Launche Vehicle).

Четырехступенчатая твердотопливная ракета SLV-3 стартовой массой около 17 тонн должна была вывести полезную нагрузку массой 40 килограммов на круговую орбиту высотой около 400 километров.

На создание носителя было потрачено 204,9 миллиона рупий (около 5 миллионов долларов по тогдашнему курсу). Более 85 % компонентов ракеты было изготовлено в Индии.

Положительную роль в развитии проекта сыграло закрытие в начале 1970-х годов ракетного полигона Вумера в Австралии. Индусы по цене металлолома купили у европейской организации ELDO стенды и пусковые установки, которые стали основой стартовых комплексов космодрома на острове Шрихарикота.

Первый суборбитальный полет прототипа SLV-3 состоялся в 1976 году, а 10 августа 1979 года состоялась первая попытка запуска ракеты в космос.

К сожалению, она была неудачной.

Приблизительно за восемь минут до назначенного времени старта автоматика остановила обратный отсчет — упало давление в баке окислителя реактивной системы управления, которая обеспечивала ориентацию ракеты после отделения первой ступени. Специалисты посоветовали Каламу возобновить отсчет, т. к. в системе управления имелся двукратный запас по рабочему телу. Старт состоялся.

Первая ступень отработала нормально. Однако через несколько секунд после начала работы двигателей второй ступени ракета потеряла ориентацию и была уничтожена по команде с земли.

Расследование причин аварии длилось шесть месяцев. Было установлено, что засорился управляющий клапан, который и погубил ракету.

* В 2002–2005 годах Абдул Калам был президентом Индии.

Вторую попытку запустить SLV-3 индийцы предприняли 18 июля 1980 года.

На этот раз предстартовый отсчет прошел без проблем, и в расчетное время ракета взмыла в небо. Спустя ровно 10 минут Абдул Калам объявил по громкоговорящей связи: «Говорит руководитель полета. SLV-3 развил требуемую скорость и достиг высоты, чтобы доставить спутник «Рохини» (Rohini) в космос. Наши наземные станции получат подтверждение, что спутник вышел на орбиту, в пределах часа».

Спутник «Рохини» представлял собой небольшой телеметрический контейнер массой 35 килограммов в форме восьмигранной призмы, переходящей в пирамиду. Согласно полетному заданию спутник предназначался для контроля бортовых систем носителя, орбитальных траекторных измерений и оценки эффективности солнечных батарей индийского производства.

Этим запуском Индия доказала способность проектировать, строить и запускать собственные спутники на собственных ракетах.

И еще один нюанс. В отличие от своей бывшей метрополии, Индия не остановилась на одном «престижном» запуске, как это сделали англичане в 1971 году, запустив ракету-носитель «Блэк-Арроу» (Black Arrow) со спутником «Просперо» (Prospero). Индийцы пошли дальше.

30 мая 1981 года была запущена третья ракета SLV-3, доставившая на орбиту спутник «Рохини-2». Правда, этот запуск был несовсем «чистым» — спутник был выведен на нерасчетную орбиту. Но у какой космической державы не было подобного рода эксцессов.

17 апреля 1983 года был запущен спутник «Рохини-3», который передавал прекрасные виды Земли из космоса.

Новые рубежи

Окрыленные первыми успехами, индийские специалисты продолжали развивать ракетно-космические технологии. В ряде случаев делали это самостоятельно, в других — использовали потенциал Советского Союза и США, с которыми сотрудничали весьма активно.

Так, в апреле 1984 года на советском космическом корабле «Союз Т-11» совершил полет в космос первый индийский космонавт, ставший 138-м космонавтом в мире. «Индийским Гагариным» стал военный летчик Ракеш Шарма (Rakesh Sharma).

Полет продолжался почти восемь суток. В качестве космонавта-исследователя Шарма проводил многозональную съемку районов Северной Индии, изучая возможность строительства гидроэлектростанции в Гималаях.

Во время полета состоялся сеанс связи с премьер-министром Индии Индирой Ганди (Indira Gandhi). На вопрос Ганди о том, как выглядит Индия из космоса, Шарма ответил строкой из патриотического стихотворения: «Лучше всех в мире».

В 1980-е годы на базе ракеты-носителя SLV-3 был создан новый носитель ASLV (Advanced Space Launch Vehicle). После двух неудачных запусков ракеты в 1987 и 1988 годах носитель 20 мая 1992 года успешно вывел на околоземную орбиту «увеличенный» спутник серии «Рохини» — SROSSC (Stretched Rohini Satellite Series) массой 150 килограммов.

За ASLV последовали четырехступенчатая ракета-носитель PSLV (Polar Satellite Launch Vehicle) и самая мощная на сегодня в Индии трехступенчатая ракета-носитель GSLV (Geosynchronous Satellite Launch Vehicle). Первая из них позволяет выводить на околоземную орбиту спутники массой до нескольких сот килограммов, а вторая — размещать их на геостационарной орбите.

Кстати, на ракете GSLV последняя, криогенная, ступень была создана с помощью российских специалистов. На первых экземплярах ракеты вообще была установлена ступень КР-12, изготовленная в России. Предполагалось, что ее производство будет развернуто в Индии. Однако, возражения США, основанные на Соглашении о контроле за распространением ракет и ракетных технологий, к которому Россия присоединилась в 1995 году, воспрепятствовало этому. Пришлось индийцам осваивать производство криогенных ступеней своими силами. С определенными трудностями, но они справились с этим.

В 1990–2000-е годы в Индии были развернуты работы по многим направлениям космической техники. Кроме создания мощных и надежных носителей, которые позволили индийцам выйти на коммерческий рынок пусковых услуг, активно велись работы по созданию телекоммуникационных систем, по развертыванию спутниковых

группировок систем дистанционного зондирования Земли, в первую очередь для нужд сельского хозяйства, по запуску метеорологических спутников, по разработке национальной навигационной системы и т. д. Это первоочередные вопросы, которые приходится решать индийской космонавтике.

Если говорить о пусковой деятельности, то в этом вопросе Индия значительно отстает и от России, и от Китая, и от США. Ежегодно с космодрома на острове Шрихарикота производится два-три пуска. Пока это полностью удовлетворяет запросы индийской ракетно-космической отрасли.

Успехи, которых достигли индийские ракетчики, не остались без внимания индийских военных. Если вопросы разработки боевых ракет они решали самостоятельно, то при запуске спутников тесно сотрудничают с Индийской организацией космических исследований. Информация, получаемая от гражданских спутников, также активно используется индийскими военными для своих нужд.

Из достижений, которых достигли индийские специалисты в последние годы, обязательно надо отметить запуск первого национального межпланетного аппарата — лунного зонда «Чандраян-1».

В космос станция была выведена 22 октября 2008 года с помощью модернизированной версии носителя PSLV; 8 ноября космический аппарат был выведен на селеноцентрическую орбиту и приступил к изучению естественного спутника нашей планеты. В число основных целей запуска «Чандраян-1» входили поиск полезных ископаемых и запасов льда в полярных регионах Луны, а также составление трехмерной карты поверхности.

14 ноября от станции отделился ударный зонд, который после 25 минут автономного полета достиг лунной поверхности. Выбросы лунной породы на месте падения модуля были проанализированы орбитальным аппаратом. Данные полученные при жесткой посадке ударного зонда предполагается использовать для мягкой посадки будущего индийского лунохода, доставка которого на Луну запланирована в ходе полета зонда «Чандраян-2».

«Чандраян-1» проработал на селеноцентрической орбите почти год. Однако в августе 2009 года связь с ним была потеряна. Его дальнейшая судьба неизвестна. Не исключено, что он уже упал на поверхность Луны. Но не исключено, что он еще продолжает кружить вокруг ночного светила. К счастью, интенсивность использования окололунных трасс еще не столь велика, чтобы он создал угрозу межпланетным перелетам.

Надо отметить, что проект «Чандраян» стал самым дешевым лунным проектом, который был реализован в мире. На аналогичные проекты в других странах было затрачено значительно больше средств.

Индийских планов громадьё

Как уже было отмечено, в настоящее время Индия делит с Европой и Японией на космических просторах 4–6 место. В каких-то вопросах индийцы опережают своих конкурентов, в чем-то отстают. Что говорит о достаточно высоком уровне развития индийской ракетно-космической отрасли, несмотря на ограниченность ресурсов, которые государство в состоянии выделять на космическую программу (Индия по-прежнему — относительно бедная страна с огромным населением, которое, к тому же, быстро увеличивается; по прогнозам специалистов, к середине XXI века по числу жителей Индия обгонит Китай). Подобные «перспективы» заставляют, с одной стороны, сбалансировано расходовать имеющиеся ресурсы, но, с другой стороны, активно развивать современные наукоемкие технологи, которые позволят стране занять соответствующее «место под Солнцем».

Год назад был принят 12-й пятилетний план развития экономики Индии на 2012–2017 годы, в котором значительное место уделено работам, проводимым Индийской организацией космических исследований. На космические программы предполагается выделить из бюджета 397,5 млрд рупий (около 8 млрд долларов).

Планируется, что за пятилетку индийскими специалистами будет осуществлено 35 пусков космических носителей, в среднем семь пусков в год. Это означает увеличение пусковой активности более чем в два раза.

В ходе этих запусков на околоземную орбиту должны быть выведены 58 индийских спутников и два-три десятка зарубежных космических аппаратов.

Наибольшее внимание будет уделено запуску телекоммуникационных спутников. За пять лет на геостационарную орбиту должны быть выведены 14 аппаратов (почти четверть от общего количества запущенных спутников), которые позволят охватить телекоммуникационными услугами современного уровня практически всю территорию Индии, а также выйти на коммерческий рынок и предоставлять аналогичные услуги другим странам Азии, Африки и тихоокеанского бассейна.

Запланирован запуск нескольких океанографических спутников, картографических аппаратов и спутников предупреждения стихийных бедствий, а также научно-исследовательских аппаратов.

Реализовав эти планы, Индия существенно увеличит и без того немалые собственные орбитальные группировки спутников дистанционного зондирования Земли и спутников связи, которые в данный момент уже являются крупнейшими группировками в Азиатско-тихоокеанском регионе. Так, индийские спутники связи обеспечивают устойчивой связью почти 90 % населения этого региона.

Продолжатся межпланетные исследования. Кроме запуска лунного зонда «Чандраян-2» с луноходом, предполагается отправить небольшой зонд к Марсу. Запуск этого космического аппарата запланирован на ноябрь 2013 года, и надо пожелать индийцам освоить и эту, новую для себя межпланетную трассу.

На изучение других планет индийцы пока не замахиваются, но думают об этом как об относительно недалекой перспективе. Если позволит экономическая ситуация, то лет через десять Индия приступит к изучению внешних планет Солнечной системы.

Ну и, конечно, пилотируемый корабль. Самостоятельно запустить космонавта индийцы мечтают давно. Когда были начаты работы в этом направлении, сроком первой экспедиции на орбиту значился 2012 год. Однако вскоре в Индии оценили тот масштаб трудностей, с которыми им придется столкнуться, и тот объем средств, который необходимо на это истратить. Поэтому сейчас говорят о 2020 годе как о наиболее вероятном сроке для совершения первого испытательного полета.

Удастся ли индийцам сделать это или первая пилотируемая миссия будет отложена на еще более поздний срок — не так уж и важно. Космонавтика Индии занимает в настоящее время довольно устойчивые позиции на мировом рынке, и продолжающееся развитие ракетно-космической отрасли страны лишь укрепит их.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев, И.** Большой космический клуб [Текст] / И. Афанасьев, А. Лавренов. — М.: РТСофт, 2006.

2. Космические исследования, выполненные за рубежом в 1975 г. [Текст]: Ежегодник БСЭ. — М.: Советская энциклопедия, 1976.

3. **Стромский, И.В.** Космические порты мира [Текст] / И.В. Стромский. — М.: Машиностроение, 1996.

ЖЕЛЕЗНЯКОВ Александр Борисович — *советник президента Ракетно-космической корпорации «Энергия»*.
194064, Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, Россия
(812) 516-27-46
zheleznyakov@rtc.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.311

Н.А. Беляев, А.Е. Егоров,
Н.В. Коровкин, В.С. Чудный

АНАЛИЗ БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ КАК АКТУАЛЬНАЯ ЗАДАЧА РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЕЭС РОССИИ

N.A. Belyaev, A.E. Egorov,
N.V. Korovkin, V.S. Chudny

RESOURCE ADEQUACY ANALYSIS AS A PRESSING PROBLEM OF PROGRESS OF RUSSIAN POWER NETWORKS

В статье рассмотрены актуальные задачи исследований балансовой надежности электроэнергетических систем. Выполнен анализ основных моделей и методов расчета показателей балансовой надежности, очерчены границы их применения. Сформулирована математическая постановка задачи расчета резерва мощности в электроэнергетической системе.

БАЛАНСОВАЯ НАДЕЖНОСТЬ. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. РЕЗЕРВ МОЩНОСТИ. БАЛАНС МОЩНОСТИ. ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.

In the paper are considered the pressing problems of power system adequacy. Basic calculating methods and models of factors of resource adequacy are investigated and validity range of these methods and models are determined. The mathematical statement of problem of power reserve in power network is described.

RESOURCE ADEQUACY. POWER SYSTEM. POWER RESERVE. CAPACITY ADEQUACY. ELECTRICITY CONSUMPTION.

При контроле состояния и планировании развития электроэнергетических систем (ЭЭС) одна из важных задач — это анализ текущих и перспективных балансов электрической энергии и мощности, основные цели которого [1]:

оценка соответствия текущего состояния, а также и намеченного на перспективу развития генерирующих мощностей и электрических сетей требованиям обеспечения потребителей электроэнергией с заданной степенью надежности;

определение потребности в новых генерирующих мощностях с учетом перспективной динамики потребления электрической энергии и мощности в ЭЭС, планируемых объемов реконструкции и демонтажа оборудования, использования мощностей действующих электростанций, экспортных поставок электроэнергии.

Балансовая надежность (БН) определяется как способность ЭЭС обеспечивать совокупную потребность в электрической мощности и энергии потребителей с учетом ограничений в виде

плановых и неплановых отключений элементов ЭЭС и ограничений на поставку энергоресурсов [2] и определяет обеспечение спроса на электроэнергию и мощность с учетом характеристик и режимов работы элементов ЭЭС.

Исследования БН ЭЭС актуальны как на региональном уровне, так и на уровне ЕЭС [3]. Их цель — разработка решений по развитию ЭЭС, обеспечивающих надежное электроснабжение и удовлетворение спроса на электроэнергию и мощность со стороны промышленных и бытовых потребителей. Методам анализа БН посвящен ряд публикаций [1, 4–6], однако единого подхода к вопросам нормирования БН и расчета ее показателей пока не выработано. Цель нашей работы — обобщить накопленный опыт и сформулировать актуальные задачи исследований БН ЭЭС, показать особенности методов и моделей, используемых в расчетах БН, установить границы и проблемы их применения.

В начале статьи будут рассмотрены основные методы расчета БН и связь между уровнем БН и резервом мощности в ЭЭС, затем введены основные способы нормирования уровней БН и резервов мощности, далее рассмотрены существующие подходы к расчету резерва мощности для различных моделей ЭЭС.

Методы расчета показателей БН. Резервы генерирующей мощности

Уровень БН определяется на основе показателей, характеризующих вероятность возникновения дефицита мощности в ЭЭС. К важнейшим из них можно отнести: частоту и продолжительность перерывов электроснабжения, вызванных дефицитом мощности; объем неотпущенной электроэнергии из-за ее дефицита; объем резерва генерирующих мощностей. Уровень БН ЭЭС формируется под влиянием большого количества факторов. Для перспективных исследований БН ЭЭС их можно разделить на группы:

состав и характеристики генерирующего оборудования ЭЭС;

динамика и характеристики потребления электроэнергии;

структура и параметры элементов передающей сети.

Сложность учета всех факторов при оценке уровней БН в основном связана с неопределенностью и вероятностным характером ряда исходных данных. Так, аварийный выход из строя генератора — случайное событие; соответственно, аварийное снижение генерации мощности есть фактор неопределенности и характеризуется некоторой вероятностью. Дополнительным фактором неопределенности при расчете генерации мощности служит вероятностный характер изменений установленной мощности (вводов и демонтажей генерирующего оборудования), особенно в долгосрочной перспективе. Кроме того, неопределенность может присутствовать в прогнозах располагаемой мощности электростанций, режимы работы которых зависят, например, от климатических условий. Фактором неопределенности при прогнозировании потребления электроэнергии и мощности служит и непосредственно погрешность прогноза. При оценке вероятности возникновения дефицита мощности также необходимо учитывать неравномерность графика нагрузки, поскольку регулярные суточные и сезонные снижения нагрузки создают фактически дополнительный резерв мощности.

Наличие факторов неопределенности предполагает вероятностный характер возникновения дефицита мощности в ЭЭС и требует применения для его расчета вероятностных методов. Существуют два основных подхода к решению данной задачи: методы статистического моделирования и аналитические методы [4].

Методы статистического хронологического или нехронологического моделирования вычисляют показатели БН, анализируя множества случайных состояний ЭЭС. Хронологическое моделирование предусматривает последовательное моделирование на каждом временном отрезке расчетного периода. Нехронологическое моделирование заключается в рассмотрении крайних и наиболее опасных с точки зрения возникновения дефицита мощности схемно-режимных ситуаций, при этом должен быть предусмотрен вспомогательный аппарат, выявляющий такие ситуации. Данные методы характеризуются большим объемом вычислений и использованием широкой статистической базы, что и позволяет получать достаточно объективные результаты.

Второй подход использует аналитическое представление вероятностей величин, определяющих возникновение дефицита, и дальнейшее

сложение рядов распределения данных вероятностей с целью построения распределения вероятности дефицита мощности ЭЭС. Аналитические функции позволяют не только рассчитать вероятность возникновения и величину дефицита, но и выполнить анализ рассматриваемой ЭЭС в целом, в частности определить факторы наибольшего влияния на возникновение и величину дефицита. Существенным недостатком данного метода ранее считалась высокая сложность получения аналитического распределения вероятностей дефицита с учетом всех влияющих факторов, которая приводила к необоснованным упрощениям (эквивалентированию) исходной модели [1, 6]. Применение современных программных комплексов позволяет отказаться от упрощений и получать достоверный результат, точность которого соответствует точности задания исходных данных.

Обеспечение заданного уровня БН ЭЭС, предотвращение вынужденного отключения или ограничения потребителей невозможно без постоянного наличия в ЭЭС избыточной мощности. Следовательно, БН ЭЭС обеспечивается созданием в ЭЭС необходимого резерва генерирующей мощности. Расчет показателей БН сводится к расчетам баланса мощности для различных состояний исследуемой ЭЭС, то есть при различных составах и мощностях генерирующего оборудования и мощностях потребителей. По результатам данных расчетов определяется вероятность возникновения дефицита мощности в ЭЭС и, соответственно, необходимая величина резерва. Поскольку речь идет о прогнозировании широкого набора состояний ЭЭС, то для оценки вероятности возникновения дефицита необходима оценка вероятности наступления соответствующих состояний — балансовых ситуаций ЭЭС. Для ее расчета используется накопленная статистика по режимам работы генерирующего оборудования и режимам потребления электроэнергии в исследуемой ЭЭС.

Топология ЭЭС и пропускная способность линий электропередачи — один из наиболее важных и один из наиболее сложно учитываемых факторов, влияющий на БН и степень резервирования. Наличие в ЭЭС «слабых» сечений, «узких» мест, ограничений по передаче мощности приводит к тому, что уровни БН (вероятности возникновения дефицита) разных частей ЭЭС различны.

При исследованиях БН выделяют две различные модели ЭЭС — концентрированную и распределенную. Выбор одной из них зависит от структуры исследуемой ЭЭС и во многом обусловливает методы определения показателей БН или величины резерва. Концентрированная модель ЭЭС предполагает, что все узлы ЭЭС полностью взаиморезервируемые. В этой модели отсутствуют сетевые ограничения, и расположение генерирующих источников с точки зрения балансовой ситуации не имеет значения. Соответственно, для концентрированной модели ЭЭС расчеты производятся без учета ограничений на пропускные способности связей, наличие в ЭЭС дефицита или избытка мощности определяется только по текущему состоянию нагрузок и генерирующего оборудования. Естественно, что корректность использования такой модели для оценки БН должна обосновываться.

Задача расчета резерва мощности и показателей БН ЭЭС с помощью ее распределенной модели — более общая. В данной модели учитываются ограничения на передачу мощности внутри ЭЭС и покрытие дефицита определяется как наличием резерва мощности, так и возможностью его передачи в дефицитный район с учетом ограничений по пропускной способности связей. Очевидно, что учет конечной пропускной способности связей в распределенной модели ЭЭС приводит к росту величины требуемого резерва в сравнении расчетами, выполненными для концентрированной модели ЭЭС, поскольку ограничения по пропускной способности не позволяют полностью использовать резерв, установленный в каком-либо узле распределенной модели ЭЭС. Предлагается задачу определения необходимого резерва мощности разделить на две:

задачу поиска наименьшей величины резерва R, обеспечивающего заданный уровень БН во всех узлах ЭЭС. Ее математическая формулировка может быть представлена в виде

$$R(\mathbf{p}) \xrightarrow[\mathbf{p}\in G]{} \min , \qquad (1)$$

где $\mathbf{p}$ — вектор значений резервной мощности в узлах ЭЭС; G — множество вариантов резервирования, обеспечивающих заданный уровень БН ЭЭС;

задачу поиска наилучшего размещения L генерирующей мощности по узлам ЭЭС, обеспечивающего наименьшую вероятность J возникновения дефицита мощности в узлах ЭЭС вследствие ограничений на пропускную способность. Математическая формулировка данной задачи:

$$J(\mathbf{p}, L) \xrightarrow[L \in \mathbf{L}]{} \min, \qquad (2)$$

где $\mathbf{L}$ — множество допустимых размещений, соответствующих вариантам резервирования G.

При расчете резерва мощности с использованием концентрированной модели ЭЭС решению подлежит только задача (1), поскольку в такой модели зависимость J от размещения L отсутствует, и задача (2) не имеет смысла. Для расчета резерва с использованием распределенной модели ЭЭС требуется последовательное решение задач (1) и (2). Отметим важные особенности данных задач:

вектор оптимизируемых параметров $\mathbf{p}$ определен на дискретном множестве, что существенно ограничивает выбор методов решения (1), исключая, в частности, градиентные методы;

множества $\mathbf{G}$, $\mathbf{L}$ для крупных ЭЭС весьма представительны, и, соответственно, решение задач (1) и (2) на основе перебора невозможно;

минимизируемые функционалы, как правило, обладают свойством жесткости, которое здесь можно упрощенно понимать как значительное различие в скорости изменении функционала R при малых изменениях различных компонент вектора $\mathbf{p}$.

Соответственно, основные свойства задач (1), (2) — это недифференцируемость, жесткость и большая размерность. Отметим также и наличие у функционалов R и J локальных минимумов, что в совокупности с предыдущим обусловливает высокую трудоемкость решения задач (1), (2). Решение таких задач стало возможным только с появлением современных высокопроизводительных вычислительных машин и методов. Разработка строгих математических методов расчета резерва мощности ЭЭС, основанных на поиске точного решения (1), (2), — актуальная задача исследований БН ЭЭС.

В целом определение показателей БН ЭЭС — сложноалгоритмизируемая трудоемкая задача, для получения решения которой необходимы обработка большого объема исходных данных и привлечение специальных методов расчета, которые позволяют и эффективно работать с вероятностными величинами, и искать решение обратных задач, характеризующихся описанными свойствами.

Нормирование резерва мощности в ЭЭС

Нормирование резервов мощности в ЭЭС связано с нормированием уровней БН, которое необходимо, прежде всего, по причине высокой социальной значимости бесперебойного электроснабжения [5]. Нормирование уровня БН производится с использованием вероятностных величин, поскольку на БН ЭЭС оказывают влияние, как было указано выше, ряд случайных факторов, основные из которых — отклонение от прогнозных величин потребления и отказы оборудования ЭЭС. Основные показатели БН, применяемые в зарубежной практике [4, 7, 8]:

вероятность дефицита мощности (LOLP, Loss of Load Probability), ожидаемое число возникновений дефицита мощности (LOLE, Loss of Load Expectation) за определенные периоды времени;

ожидаемая величина недопоставленной энергии (EUE, Expected Unserved Energy).

В отечественной литературе [1] введено понятие интегральной вероятности J отсутствия дефицита мощности (вероятность бездефицитной работы, которая определяется как относительная продолжительность бездефицитной работы ЭЭС). Данный показатель успешно использовался в отечественной практике для оценки и сравнения уровней БН ЭЭС.

Уровень БН ЭЭС, как было отмечено выше, определяется величиной резерва мощности, расчет которого целесообразно производить для режимов с наибольшими рисками возникновения дефицита. Как правило, таков режим зимних максимальных нагрузок. При необходимости могут рассматриваться другие режимы, характеризующиеся, например, сезонным снижением располагаемой мощности. Установленная величина резерва мощности будет соответствовать определенному уровню БН. В Методических рекомендациях [9] даны значения необходимого резерва мощности в процентах от максимума потребления нагрузки, рекомендованные для принятия на стадии раз-

работки перспективных балансов мощности ЕЭС и ОЭС (Европейская часть ЕЭС — 17 %, ОЭС Сибири — 12 %, ОЭС Востока — 22 %).

Резерв в ЭЭС классифицируется в зависимости от его назначения и предусматривается для устранения дефицита мощности, когда возникают следующие случаи:

незапланированные отклонения потребления (нерегулярные колебания нагрузки, влияние аномальных температур, экономических факторов и др.);

отключения генерирующего оборудования (плановые, аварийные);

отключения сетевого оборудования, приводящие к нарушению баланса мощности.

Наиболее общая классификация резервов генерирующей мощности [1, 5, 9] предусматривает следующие их виды:

ремонтный резерв, необходимый для возмещения мощности оборудования электростанций, выводимого в плановый ремонт;

оперативный резерв, необходимый для компенсации аварийного снижения генерации мощности (аварийный резерв), а также случайных отклонений нагрузки от расчетных значений (нагрузочный резерв);

стратегический (народнохозяйственный) резерв, предназначенный для компенсации нарушений баланса мощности из-за непредвиденных отклонений от прогноза генерации и потребления мощности с учетом инерционности энергетического строительства.

По установленному для ЭЭС уровню БН с учетом описанных выше факторов рассчитывается требуемое значение резерва мощности в ЭЭС. При этом имеется в виду оперативный резерв, так как ремонтный резерв предусматривается только для компенсации мощности оборудования, выводимого в плановый ремонт. Поскольку плановый ремонт оборудования не является случайным событием, то ремонтный резерв может быть заблаговременно предусмотрен на основании планов или нормативов проведения ремонтов различного вида для агрегатов электростанций.

Нормирование резерва мощности в ЭЭС (коэффициента резервирования) состоит из следующих последовательно решаемых задач:

обоснования того или иного уровня БН, устанавливаемого в ЭЭС;

расчета резерва мощности, соответствующего установленному уровню БН;

определения размещения резервов мощности в ЭЭС (при исследовании распределенных моделей ЭЭС).

Нормирование резервов мощности — сложная технико-экономическая задача, поскольку создание резервной мощности в ЭЭС сопряжено со значительными затратами, которые необходимо сопоставлять со снижением ущерба от нарушений электроснабжения потребителей и нарушений функционирования ЭЭС. Сложности решения таких задач, а также отсутствие однозначности в исходных данных, которое зачастую приводит к необходимости рассмотрения нескольких сценариев развития балансовой ситуации в ЭЭС, обусловили появление различных подходов к определению необходимого уровня резервирования мощности в ЭЭС. Далее рассмотрим основные принципы расчета оперативного резерва мощности в концентрированной и распределенной моделях ЭЭС.

Расчет оперативного резерва в концентрированной модели ЭЭС

В концентрированной модели ЭЭС пропускные способности элементов сети не ограничивают взаимное резервирование узлов, и пропускная способность связей заведомо больше возможной величины потоков мощности, возникающих при дефиците или избытке мощности. Рассмотрим обоснование и расчет оперативного резерва мощности для концентрированной модели ЭЭС без внешних связей.

Технико-экономическое обоснование уровня БН, устанавливаемое для ЭЭС в виде, например, значения интегральной вероятности J отсутствия дефицита, определяется путем минимизации суммарных затрат на установку резервной мощности $З_{рез}(J)$ (руб.) и компенсации ущерба от дефицита $У(J)$ (руб.):

$$З = З_{рез}(J) + У(J) \xrightarrow[J]{} \min. \qquad (3)$$

Первое слагаемое в (3) можно раскрыть, используя показатель $к_{рез}$ удельных капиталовложений в строительство резервной мощности (стоимость 1 кВт установленной мощности, руб./кВт), который определяется по показателям пиковых электростанций, поскольку число часов использования резервной мощности мало. Опре-

деление второго слагаемого в (3) затруднено, так как величина удельного ущерба y_0 (руб./кВт·ч) зависит от вида потребителя, глубины и продолжительности ограничения электроснабжения. В [1] предложено использовать линейную зависимость ущерба от недоотпуска электроэнергии, объясняя это тем, что отключение (ограничение) потребителей — управляемый процесс, и потребители подлежат отключению (ограничению) по мере возрастания величины ущерба (то есть сначала отключаются потребители с минимальным ущербом, далее — в порядке его возрастания). Там же отмечено, что подобная аппроксимация может привести к существенной погрешности. Трудности в определении удельного ущерба обусловили различные подходы в установлении нормативов надежности, в том числе к используемому сейчас во многих странах чисто нормативному методу без рассмотрения экономической оценки надежности.

После определения величины удельного ущерба y_0 формулу (3) можно переписать в виде

$$З = к_{рез} P_{рез}(J) + y_0 W_{нед}(J) \xrightarrow[J]{} \min, \qquad (4)$$

где $P_{рез}(J)$ и $W_{нед}(J)$ — соответственно резервная мощность (кВт) и ожидаемый недоотпуск электроэнергии (кВт·ч) при некотором уровне J. В результате решения (4) будет получено оптимальное значение вероятности отсутствия дефицита — $J_{опт}$:

$$J_{опт} = 1 - \frac{к_{рез}}{y_0 T},$$

где T — расчетный период. В [1] с использованием характерных значений $к_{рез}$ и y_0 получено $J_{опт} = 0{,}996$.

Полученное значение $J_{опт}$ устанавливается как расчетный уровень БН ЭЭС. Это означает, что любой дефицит мощности, который может возникнуть в ЭЭС с вероятностью, превышающей $1 - J_{опт}$, должен быть скомпенсирован установленным в ЭЭС резервом. Таким образом, для определения величины оперативного резерва, соответствующего $J_{опт}$, рассчитывается зависимость вероятности дефицита от его величины — распределение вероятностей дефицита мощности. Расчет данного распределения сводится к нахождению баланса мощности для различных состояний ЭЭС, т. е. при различных вариантах состава и мощностей генерирующего оборудования, а также мощностях нагрузок потребителей, причем с учетом вероятности данных состояний.

Расчет генерируемой мощности для состояний ЭЭС производится на основе величины установленной мощности электростанций ЭЭС с учетом ввода новых и демонтажа существующих энергоблоков по соответствующим планам. При расчете рабочей мощности электростанций из установленной мощности вычитаются ограничения и величина ремонтного резерва, соответствующая мощности выводимого в плановый ремонт оборудования [9]. Полученная таким образом величина отражает генерацию без учета аварийного выхода из строя генерирующего оборудования. Затем рассчитывается распределение вероятностей аварийного снижения генерации мощности в ЭЭС путем обработки показателей аварийности всех агрегатов, входящих в состав ЭЭС. В общем случае это весьма трудоемкая задача, поскольку требуется рассчитать вероятности выхода из строя различного числа генераторов в различных сочетаниях. Для серийных генераторов, по эксплуатации которых накоплен значительный опыт, показатели аварийности приводятся в справочниках, например в [10].

Расчет мощности нагрузки для состояний ЭЭС производится на основе значения максимума потребления мощности с учетом неравномерности графика нагрузки (регулярных снижений мощности нагрузки) и ошибки прогнозирования. Неравномерности графика нагрузки учитываются на основе прогнозируемых характеристик графиков нагрузки, при этом снижение нагрузки относительно максимума рассматривается как дополнительный резерв мощности, который полностью или частично компенсирует дефицит от аварийного снижения генерации. При учете ошибок прогнозирования и случайных отклонений потребления от прогнозируемых объемов в силу большого числа влияющих факторов распределение вероятностей отклонений потребления мощности от прогнозного значения принимается нормальным, параметр (среднеквадратичное отклонение) которого определяется из расхождений прогнозных и фактических значений потребления за прошедший период.

Для получения искомого распределения вероятностей дефицита необходимо сложить два

ряда распределений — аварийного снижения генерирующей мощности и отклонений потребления мощности с учетом неравномерности графика нагрузки и ошибок прогнозирования. По построенной зависимости вероятности от величины дефицита определяется значение аварийного резерва мощности, соответствующее $J_{\text{опт}}$.

Таким образом, непосредственно расчет резерва в концентрированных моделях ЭЭС не представляет значительной сложности. Возможные трудности могут быть связаны с определением $J_{\text{опт}}$ в связи с неоднозначными оценками y_0.

Расчет оперативного резерва в распределенных моделях ЭЭС

Расчет резерва мощности в распределенной модели ЭЭС — существенно более сложная задача в сравнении с расчетом резерва мощности в концентрированной модели ЭЭС. Причины этого:

различие уровней БН в узлах ЭЭС, что связано с невозможностью неограниченной передачи резервной мощности внутри ЭЭС, и в то же время необходимость обеспечения одинакового (установленного) уровня БН во всех узлах ЭЭС;

необходимость определения не только величины, но и места размещения резерва, что также связано с наличием сетевых ограничений.

При принятии распределенной модели ЭЭС в общем случае невозможно однозначно установить соответствие между расчетным уровнем БН ($J_{\text{опт}}$) и величиной оперативного резерва мощности, поскольку величина резерва мощности будет зависеть также от его размещения.

Обоснование величины резерва в распределенной ЭЭС сводится, как и для концентрированной ЭЭС, к поиску минимума затрат. При этом в целевую функцию добавляется слагаемое — затраты на сооружение связей, определяющиеся удельными затратами $к_л$ на строительство ЛЭП и их пропускной способностью L [1]:

$$З = к_{\text{рез}} P_{\text{рез}} + к_л L + .$$

$$+ y_0 W_{\text{нед}}(P_{\text{рез}}, L) \xrightarrow[P_{\text{рез}}, L]{} \min. \qquad (5)$$

Определение глобального минимума (5) встречает сложности, поскольку вероятность J бездефицитной работы в данном случае есть функция и мощности резерва $P_{\text{рез}}$, и пропускной способности L.

Один из распространенных способов определения показателей БН и расчета резерва в распределенных моделях ЭЭС предполагает разбиение распределенной модели ЭЭС на несколько концентрированных подсистем, соединенных линиями с ограниченной пропускной способностью. При изолированной работе концентрированных подсистем оперативный резерв мощности в каждой из них определяется так, как это описано выше. При наличии связей между данными ЭЭС резервная мощность в случае необходимости может передаваться из одной концентрированной подсистемы в другую. Таким образом, эффективность использования резервной мощности может быть повышена, а ее суммарная величина снижена. По результатам расчетов резерва мощности в каждой концентрированной подсистеме с учетом пропускных способностей связей между ними определяются величина и размещение резерва мощности в распределенной модели ЭЭС.

Формализованная методика разбиения распределенной ЭЭС на концентрированные подсистемы отсутствует. Существуют различные подходы к решению данной задачи, основанные на анализе модели электрической сети, но они, как правило, используют ряд допущений, в результате которых полученное решение можно рассматривать лишь как оценочное.

В качестве перспективного подхода к определению размещения резервов генерирующей мощности можно предложить применение дробно-полиномиальных зависимостей, полученных как следствия билинейной теоремы [11]. Применение такого подхода позволяет существенно повысить эффективность расчетов, не внося в результаты существенной погрешности.

В целом можно отметить: универсальные методы решения задачи расчета резерва мощности в распределенных моделях ЭЭС отсутствуют, что связано с их высокой вычислительной сложностью.

Подведем итоги.

Общая методика расчета резерва мощности в концентрированных энергосистемах разработана и описана в рассмотренных источниках. Требуемый уровень БН может быть обоснован посредством технико-экономических расчетов. Наибольшую трудоемкость представляет обработка вероятностных характеристик аварийности оборудования.

Расчет резерва мощности и его расположение в распределенных моделях ЭЭС — трудоемкая задача, к решению которой в настоящее время нет единого подхода. Перспективным представляется разработка качественно новых подходов к решению задач расчета и распределения резервов активной мощности в ЭЭС произвольной конфигурации, которые бы использовали максимально полную модель исследуемой ЭЭС.

Об актуальности изложенных разработок свидетельствует то, что один из авторов этой статьи — Н.А. Беляев, аспирант Института энергетики и транспортных систем СПбГПУ — один из четырех молодых ученых-политехников, ставших обладателями премии РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волькенау, И.М.** Экономика формирования электроэнергетических систем [Текст] / И.М. Волькенау, А.Н. Зейлигер, Л.Д. Хабачев.— М.: Энергия, 1981.— 322 с.

2. **СТО 17330282.27.010.001–2008.** Электроэнергетика. Термины и определения [Текст].— Утвержден приказом РАО «ЕЭС России» от 17 июня 2008 № 289.

3. **Шульгинов, Н.Г.** Система перспективного планирования развития ЕЭС России [Текст] / Н.Г. Шульгинов, А.В. Ильенко, Д.В. Пилениекс // Электрические станции.— 2012. № 7.— С. 5–10.

4. **Чукреев, Ю.Я.** Сравнение отечественных и зарубежных вероятностных показателей балансовой надежности электроэнергетических систем [Текст] / Ю.Я. Чукреев // Известия РАН. Энергетика.— 2012. № 6.— С. 27–38.

5. **Шульгинов, Н.Г.** Резервы мощности в ЕЭС России. Современное состояние и перспективы [Текст] / Н.Г. Шульгинов, В.А. Дьячков // Энергетик.— 2008. № 9.— С. 10–13.

6. **Маркович, И.М.** Режимы энергетических систем [Текст] / И.М. Маркович.— М.: Энергия, 1969.— Изд. 4-е, переработ. и доп.352 с.

7. **Chao, H.** LOLE/Resource Adequacy Methodology [Электронный ресурс] / H. Chao.— Режим доступа: http://www.isonewengland.org/committees/comm_wkgrps/othr/icsp/mtrls/2005/nov182005/lole_resource_adequacy_methodology.pdf. Дата обращения: 28.03.2013.

8. **Billington, R.** Reliability Evaluation of Power Systems [Текст] / R. Billington, N. Ronald Allan.— Second Edition.— New York and London: Plenum Press, 1996— 509 p.

9. Методические рекомендации по проектированию развития электроэнергетических систем [Текст] / Минэнерго РФ.— Утверждены приказом Минэнерго РФ от 30 июня 2003 № 281.

10. Справочник по проектированию электроэнергетических систем [Текст] / Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 352 с.

11. **Беляев, Н.А.** Использование билинейной теоремы для решения задач оптимизации потоков мощностей в энергосистемах [Текст] / Н.А. Беляев, Н.В. Коровкин, О.В. Фролов, В.С. Чудный // Электротехнические комплексы и системы управления.— 2012. № 1— С. 77–80.

БЕЛЯЕВ Николай Александрович — *аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812)552-50-72
Belyaev.NA@yandex.ru

ЕГОРОВ Андрей Евгеньевич — *заместитель заведующего отделом проектирования и развития энергосистем ОАО «Научно-технический центр Единой энергетической системы».*
194223, ул. Курчатова д. 1 лит. «А», Санкт-Петербург, Россия
(812) 292-94-42
egorov_a@ntcees.ru

КОРОВКИН Николай Владимирович — *доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-75-72
nikolay.korovkin@gmail.com

ЧУДНЫЙ Владимир Сергеевич — *кандидат технических наук доцент кафедры электрических систем и сетей института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-50-72
Chudnyvs@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.165

К.Н. Боришанский

РАЗНОВИДНОСТИ АВТОКОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН И МЕРЫ БОРЬБЫ С НИМИ

K.N. Borishanskii

DIFFERETS FORMS OF STEAM TURBINES BLADES FLUTTER AND METHODS OF FLUTTER PREVENTION

Рассмотрены возможные механизмы возникновения автоколебаний лопаток последних ступеней мощных паровых турбин. Выполнен анализ экспериментальных данных, полученных в процессе эксплуатации. Сформулированы рекомендации по уменьшению опасности возникновения автоколебаний.

ПАРОВАЯ ТУРБИНА. РАБОЧАЯ ЛОПАТКА. АВТОКОЛЕБАНИЯ. ДИСКРЕТНО-ФАЗОВЫЙ МЕТОД. ВИБРАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ.

Different forms of last stages turbines blades flutter are observed. Analysis of experimental data, received in service, is realized. Recommendations concerning reduction of flutter danger are formulated.

STEAM TURBINE. BLADE. FLUTTER. DISCRETE-PHASE METHOD. VIBRATION RELIABILITY.

Одна из наиболее сложных задач, возникающих при создании новых мощных паровых турбин, — это обеспечение вибрационной надежности лопаток последних ступеней. Уровень динамических напряжений в лопатках не может быть определен расчетным путем, поэтому для обеспечения их безаварийной работы необходимо выполнение экспериментальных исследований. Одно из наиболее эффективных средств повышения надежности работы лопаток стационарных паровых турбин — вибрационная отстройка, заключающаяся в обеспечении достаточного отличия рабочих оборотов от оборотов, на которых возникают резонансы с наиболее возбудимыми собственными формами. Вибрационная отстройка выполняется в вакуумной камере (Кемпбелл-машина) и резко снижает опасность усталостных повреждений лопаток вследствие резонансных колебаний. Однако в процессе проведения вибрационной отстройки не удается получить сведений о возможной опасности срывных и автоколебаний. Опасность этих типов колебаний относительно возрастает для лопаток последних ступеней наиболее мощных турбин в связи с увеличением их гибкости и нагруженности. Для определения интенсивности таких колебаний необходимо проведение испытаний в экспериментальных турбинах, объем которых, к сожалению, весьма ограничен. Кроме того, даже в экспериментальных турбинах не удается выявить влияние на уровень динамических напряжений в лопатках некоторых режимов, имеющих место в условиях эксплуатации (синхронизация, сброс нагрузки, кинематическое возбуждение колебаний со стороны ротора, аварийные режимы). В связи с недостаточным объемом экспериментальных исследований в условиях эксплуатации в ряде случаев были зарегистрированы усталостные поломки лопаток, имеющих вполне удовлетворительные частотные характеристики, для которых вероятность повреждений вследствие резонансных колебаний была весьма мала.

Более ясное понимание особенностей вибрационного состояния лопаток в условиях эксплуатации, а также причин их усталостных повреждений появилось после внедрения систем контроля, основанных на так называемом дискретно-фазовом методе (ДФМ). Сущность метода заключается в измерениях амплитуд периферийных сечений с помощью неподвижных датчиков, расположенных против торцов вра-

щающихся лопаток [1]. Модернизированная методика, пригодная также и для контроля колебаний бандажированных лопаток, разработана на ЛМЗ [2]. Результаты, полученные с помощью модернизированной методики на ряде электростанций, а также анализ экспериментальных результатов представлены в [3].

Лопатки последних ступеней мощных паровых турбин, как правило, соединяются замкнутыми на круг связями (бандажные полки, демпферные проволоки). Подобные лопаточные венцы представляют собой частный случай циклически-симметричных систем, колебания которых подразделяются на синфазные и внутрипакетные. При синфазных колебаниях амплитуды всех лопаток равны, при внутрипакетных — изменяются по окружности по закону $\sin(m\varphi)$, где m — число узловых диаметров. Неравномерный по окружности, но стационарный во времени поток теоретически может возбудить только резонансные внутрипакетные колебания лопаточного венца с числом узловых диаметров m, совпадающим с кратностью колебаний k (число колебаний лопатки за оборот ротора). Для всех остальных собственных форм суммарная работа возмущающих сил равна нулю, т. е. равна нулю величина так называемого пакетного множителя [4]. С учетом этого факта нормы, действующие в стационарном турбостроении, требуют отстройки от рабочих оборотов только дисковых форм (первая, наиболее возбудимая форма внутрипакетных колебаний) при выполнении условия $m = k$.

Результаты приведенных в [3] вибрационных испытаний, выполненных на электростанциях с помощью модернизированной методики ДФМ, подтвердили теоретические соображения. Наибольшие по величине резонансные дисковые колебания (хотя и не представлявшие опасности для усталостной прочности лопаток) были зарегистрированы на проходных оборотах и соответствовали формам с $m = k$. Однако, помимо этих форм, были обнаружены незначительные по величине резонансные колебания, соответствовавшие другим собственным формам (с $m = 0$ и $m = 1$), вызванные кинематическим возбуждением со стороны ротора. Кроме того, были зарегистрированы срывные колебания при малых объемных расходах пара, уровень которых также был незначителен при условии соблюдения инструкции по эксплуатации турбины.

В нескольких случаях с относительно большими амплитудами были зарегистрированы автоколебания наиболее гибких и нагруженных бандажированных лопаток последних ступеней мощных паровых турбин. Оказалось, что автоколебания могли реализовываться с дисковыми формами, соответствующими относительно большому числу узловых диаметров m ($m = 9$–14). Во всех зарегистрированных случаях колебания носили характер «бегущей волны», направление распространения которой было противоположно направлению вращения ротора турбины. В [3] отмечается, что при автоколебаниях лопаток рассматривавшихся ступеней числа Струхаля, вычисляемые по формуле $\mathrm{Sh} = bp/W$ (b — хорда, $p = 2\pi f$ — круговая частота автоколебаний, W — относительная скорость потока), составляли всего 0,2–0,25. Малость чисел Струхаля дает основание оценить (по крайней мере, качественно) причину возникновения автоколебаний в квазистационарной постановке.

Выполненный в [3] анализ экспериментальных данных в квазистационарной постановке показал, что одна из наиболее вероятных причин возникновения дисковых форм автоколебаний связана с наличием сдвига по фазе между деформациями изгиба и кручения. При зарегистрированных дисковых формах для лопаток, расположенных в пучностях по окружности колеса, колебания носили практически чисто аксиальный характер, а крутильная составляющая равнялась нулю. С другой стороны, для лопаток, расположенных в узлах, именно крутильная составляющая, вызванная закручиванием лопаток поясом бандажных полок, была преобладающей.

При колебаниях типа «бегущей волны», когда амплитуды всех лопаток на колесе теоретически равны, но достигаются в различные моменты времени, это означает, что между деформациями изгиба и кручения имеется сдвиг по фазе, равный 90°. В результате на колеблющиеся лопатки от потока действуют усилия, пропорциональные скорости колебаний. В случае, когда направление распространения «бегущей волны» противоположно направлению вращения ротора эти усилия, как показано в [3], оказываются в фазе со скоростью и, следовательно, поддерживают автоколебания. Если бы направление распространения «бегущей волны» совпадало с направлением вращения ротора турбины, то усилия

изменялись бы в противофазе со скоростью колебаний и вызывали появление аэродемпфирования. Таким образом, предложенное пояснение механизма взаимодействия колеблющихся лопаток с потоком качественно верно объясняло все экспериментально обнаруженные особенности автоколебаний. Результаты расчетов нестационарного воздействия потока на лопаточный венец, совершающий колебания с различными собственными формами, которые были получены в различных организациях в более общей постановке, без предположения о квазистационарности процесса, также подтвердили возможность подвода энергии от потока к лопаткам при колебаниях типа «бегущей волны». Для возникновения автоколебаний подводимая от потока энергия должна превышать энергию, рассеянную за счет механического демпфирования в лопаточном венце, а при установившихся колебаниях эти энергии должны быть равны. Поскольку величина механического демпфирования и его зависимость от амплитуды колебаний не могут быть определены расчетным путем, то знание величины энергии, подведенной от потока к лопаткам, еще не дает возможности вычислить границы возникновения автоколебаний и их интенсивность. Тем не менее понимание причин возникновения автоколебаний позволяет рекомендовать наиболее эффективные меры борьбы с ними.

В последнее время с помощью модернизированного варианта ДФМ в условиях эксплуатации были зарегистрированы автоколебания, механизм возбуждения которых качественно отличался от описанного выше. Анализ экспериментальных данных показал, что автоколебания реализовывались с синфазными собственными формами лопаточного венца. Кроме того, при наиболее интенсивных автоколебаниях процесс не ограничивался одной, а охватывал одновременно бандажированные лопатки четырех ступеней (последняя и предпоследняя ступени левого и правого потоков двухпоточного ротора низкого давления мощной паровой турбины). Между предпоследней и последней ступенями в обоих потоках был организован отбор пара к подогревателю низкого давления. Частоты автоколебаний были близки к первой частоте синфазных колебаний лопаток предпоследней ступени и второй частоте синфазных колебаний лопаток последней ступени, по расчету незначительно отличавшихся друг от друга. Частота процесса во всех четырех ступенях была одинаковой (несмотря на то, что из-за технологических отклонений при изготовлении и сборке частоты даже разных комплектов лопаток, изготовленных по одному чертежу, должны немного отличаться). Были зарегистрированы три различных, хотя и близких, частоты автоколебаний. Формы, соответствующие различным частотам, отличались фазами колебаний четырех лопаточных венцов (лопатки различных ступеней колебались либо в фазе, либо в противофазе; промежуточных значений сдвига по фазе обнаружено не было).

Прежде чем привести экспериментальные данные, иллюстрирующие перечисленные выше особенности автоколебаний, кратко опишем методику измерений колебаний бандажированных лопаток с помощью модернизированного варианта ДФМ. Подробное описание методики приведено в [3].

Для возможности выполнения измерений в пределах бандажных полок лопаток устанавливаются магниты малого диаметра в немагнитных корпусах. Поперечные сечения сердечников неподвижных индукционных датчиков, регистрирующих колебания, имеют форму вытянутых прямоугольников, составляющих определенный угол β с осью турбины. Для регистрации преимущественно аксиальных колебаний составляется измерительная пара из двух датчиков, расположенных на небольшом расстоянии S друг от друга, причем поперечное сечение сердечника одного из датчиков составляет угол β с осью турбины, а второго — угол $(-\beta)$. Отсчет времени начинается в момент прохождения магнита мимо первого датчика, заканчивается — в момент прохождения мимо второго. Сравнение измеренного интервала времени с временем одного оборота ротора (определяемого с помощью дополнительного оборотного датчика) дает возможность с высокой точностью вычислить расстояние между сердечниками датчиков в плоскости вращения магнита. Если лопатка в момент прохождения мимо датчиков отклонится вследствие аксиальных колебаний на величину Δx, то расстояние между сердечниками датчиков в плоскости вращения магнита изменится на величину ΔS пропорциональную осевому сме-

щению. При автоколебаниях с частотой f и амплитудой x_0 отклонение периферийного сечения лопатки будет изменяться во времени по закону $x_0\sin(2\pi ft)$, поэтому изменение показаний пары датчиков будет пропорционально этой величине в момент выполнения замеров. Поскольку частота автоколебаний f не кратна числу оборотов ротора в секунду n, то уже при выполнении замеров в течение небольшого промежутка времени будет измерена величина $\Delta S_{\max}$, пропорциональная x_0, т. е. будет иметь место соотношение

$$\Delta S_{\max} = \frac{1}{k_{\text{п}}} x_0, \qquad (1)$$

где коэффициент пропорциональности $k_{\text{п}}$ зависит от величины угла β, а также, к сожалению, от радиального зазора между магнитом и датчиком и осевого смещения магнита относительно центра датчика. В связи с этим экспериментальную зависимость $k_{\text{п}}$ от радиального зазора и осевого смещения определяют на тарировочном стенде до проведения станционных испытаний.

Если увеличивать расстояние S между датчиками (база пары датчиков), то никакого выигрыша в чувствительности измерительной схемы при регистрации аксиальных колебаний получить не удастся. Действительно, если расстояние S будет столь велико, что при его прохождении лопаткой необходимо учитывать изменение фазы колебаний, то связь между величинами $\Delta S_{\max}$ и x_0 окажется следующей:

$$\Delta S_{\max} = \frac{1}{k_{\text{п}}} x_0 \cos\frac{fS}{2nR}, \qquad (2)$$

где R — радиус установки датчиков ДФМ, а n, как и ранее, число оборотов ротора в секунду. Как следует из сопоставления формул (1) и (2), увеличение базы пары датчиков S будет сопровождаться, как правило, уменьшением величины $\Delta S_{\max}$ при фиксированном значении x_0.

Для надежной оценки уровня динамических напряжений в лопатках необходимо знать не только амплитуду колебаний, но и их частоту. Следует иметь в виду, что при использовании ДФМ регистрируется не весь колебательный процесс, а только его дискретные значения в момент прохождения лопатки мимо датчика. Поскольку частота опроса n, совпадающая с числом оборотов ротора, ниже частоты колебаний f, то по показаниям одной пары датчиков истинное значение частоты определить невозможно. Между частотой $f_{\text{изм}}$, «измеренной» с помощью одной пары датчиков, и истинной частотой f имеет место соотношение

$$f = qn \pm f_{\text{изм}}, \qquad (3)$$

где q — целое число.

Для нахождения истинной частоты колебаний необходимо выполнить измерения в нескольких точках по окружности, т. е. воспользоваться показаниями, по крайней мере, двух пар датчиков ДФМ [3].

С учетом сказанного выше стандартная схема измерений, включающая 2–3 пары датчиков с малыми базами, оптимальна при регистрации аксиальных колебаний.

При регистрации автоколебаний, происходивших с синфазными собственными формами, оказалось необходимым изменить методику измерений. Были составлены «дополнительные» измерительные пары за счет комбинации датчиков, принадлежащих к различным «обычным» парам. Если при колебаниях периферийное сечение лопатки отклоняется как в аксиальном (x_0), так и в тангенциальном (y_0) направлениях, то можно показать, что результаты измерений с помощью пары датчиков с большой базой будут следующими:

$$\Delta S_{\max} = \sqrt{\left(\frac{1}{k_{\text{п}}} x_0 \cos\frac{fS}{2nR}\right)^2 + \left(2y_0 \sin\frac{fS}{2nR}\right)^2}. \qquad (4)$$

При малых S формула (4) естественно переходит в формулу (1).

Если составить дополнительную пару датчиков, поперечные сечения сердечников которых будут иметь одинаковые углы β с осью турбины (+β или –β для обоих датчиков), то будет справедливо соотношение

$$\Delta S_{\max} = \left(\pm\frac{1}{k_{\text{п}}} x_0 + 2y_0\right)\sin\frac{fS}{2nR}, \qquad (5)$$

причем знак первого слагаемого определяется знаком угла β.

Наконец, можно определить взаимные смещения лопаток, расположенных на различных угловых расстояниях друг от друга, с помощью одного и того же датчика. Начало измерения процесса автоколебаний будет определяться прохождением мимо датчика первой лопатки, окончание — прохождением второй, расположенной на угловом расстоянии Δφ от первой.

Если в момент измерений лопатки будут колебаться в противофазе, то будет найдена сумма амплитуд, если в фазе — то разность. Проведя измерения при различных значениях Δφ, можно найти распределение амплитуд по окружности колеса.

В частности, если бы автоколебания реализовывались в виде дисковых форм с m узловыми диаметрами и имели характер «бегущей волны», распространяющейся против направления вращения ротора, то максимальное изменение показаний было бы равно

$$\Delta S_{\max} = \left(\pm \frac{1}{k_{\text{п}}} + 2y_0 \right) \sin \frac{\left(\frac{f}{n} - m \right) \Delta\varphi}{2}. \qquad (6)$$

Если бы автоколебания реализовывались с синфазными собственными формами, то была бы справедлива формула

$$\Delta S_{\max} = \left(\pm \frac{1}{k_{\text{п}}} + 2y_0 \right) \sin \frac{f \Delta\varphi}{2n}. \qquad (7)$$

С учетом приведенных соотношений проанализируем полученные в процессе эксплуатации экспериментальные результаты. На рис. 1 приведено сравнение амплитуд одной и той же лопатки предпоследней ступени, определенных парами датчиков с «малой» (S = 58 мм) и «большой» (S = 734 мм) базами.

Из представленных на рис. 1 данных следует, что «измеренная» частота автоколебаний составляла ~2,2 Гц. Анализ результатов измерений, полученных с помощью двух пар датчиков, позволил установить, что истинная частота f равнялась 97,8 Гц, т. е. формула (3) удовлетворялась при условии q = 2. Кроме того, из представленных данных следует, что колебания носили преимущественно тангенциальный характер. Действительно, если бы колебания были чисто аксиальными, то в соответствии с формулой (2) по известным значениям S, R и f показания датчиков с большой базой должны быть примерно на 15 % меньше, чем с малой. Фактически же, как следует из рис. 1, показания возросли более чем в пять раз. Это свидетельствует о преимущественно тангенциальном характере колебаний и необходимости использования для определения амплитуд колебаний формулы (4), а не (2).

Наличие большой тангенциальной составляющей фактически уже свидетельствует о синфазности зарегистрированных автоколебаний, т. к. при дисковых формах тангенциальная составляющая прогиба периферийного сечения практически полностью ограничивается большой жесткостью «пояса бандажных полок» на растяжение — сжатие. Прямое подтверждение синфазности собственных форм было получено при сравнении расчетной и экспериментальной зависимостей величин взаимных смещений лопаток от углового расстояния между ними (рис. 2).

Расчетная зависимость на рис. 2 вычислялась по формуле (7) (при условии, что множитель в скобках равен 1), экспериментальная зависимость определялась при всех возможных угловых расстояниях между лопатками. Для повышения точности измерений подсчитывалось среднее

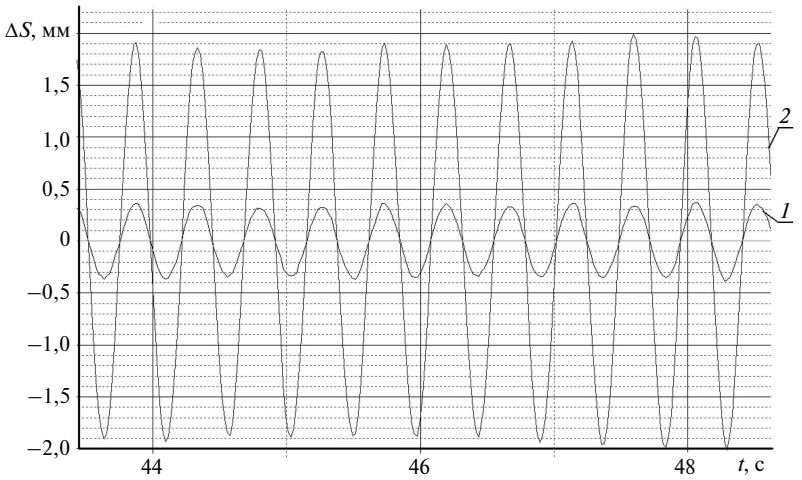


Рис. 1. Сравнение амплитуд колебаний, определенных парами датчиков с малой (*1*) и большой (*2*) базами

арифметическое по всем парам лопаток, оснащенных магнитами. За единичные экспериментальные значения принимались максимальные величины, полученные при любых угловых расстояниях между лопатками. Относительное угловое расстояние между лопатками вычислялось по формуле $\varphi_{отн} = \Delta\varphi/2\pi$. Как видно, для всех рассмотренных значений $\varphi_{отн.}$ экспериментальные и расчетные величины практически в точности совпадают. Это служит дополнительным подтверждением того, что автоколебания реализовывались именно с синфазной собственной формой.

Вторая отличительная черта зарегистрированных автоколебаний — то, что они возникали не в одной, а (в большинстве случаев и с наибольшей интенсивностью) в нескольких ступенях турбины.

В качестве примера на рис. 3, *а* приведена зависимость от времени интенсивности автоколебаний лопаток предпоследних ступеней левого и правого потоков, на рис. 3, *б* — лопаток последних ступеней. Описан процесс ухудшения вакуума в конденсаторе при нагрузке, составляющей 70 % номинальной. Поскольку колебания лопаток предпоследней ступени носили преимущественно тангенциальный характер, а последней ступени — преимущественно аксиальный, то на рис. 3, *а* показаны взаимные смещения лопаток, расположенных на расстоянии S^* друг от друга и колеблющихся в момент измерения в противофазе, а на рис. 3, *б* — осевая составляющая прогиба лопаток (величина S на рис. 3, *б* — расстояние между датчиками, составляющими измерительную пару). Интенсивность автоколебаний пропорциональна величинам $\Delta S_i = S_i - S_{ср}$, где S_i и $S_{ср}$ — результат i-го замера и среднее значение за весь период измерений. На рис. 3, *а*, *б* переход к величинам ΔS_i программным путем не был выполнен для того, чтобы показания лопаток правого и левого потоков не накладывались друг на друга. Анализ результатов измерений позволил установить, что колебания лопаток всех ступеней происходили с единой частотой, примерно равной 115 Гц.

Выше отмечено, что согласно расчетам нестационарного воздействия потока на лопаточный венец, совершающий колебания с различными собственными формами, автоколебания возможны только для дисковых форм и при условии, что направление распространения «бегущей волны» противоположно направлению вращения ротора турбины. При синфазных колебаниях лопаточного венца воздействие потока сводится только к появлению аэродемпфирования (для тангенциальных синфазных колебаний подобный результат может быть получен и при рассмотрении задачи в квазистационарной постановке).

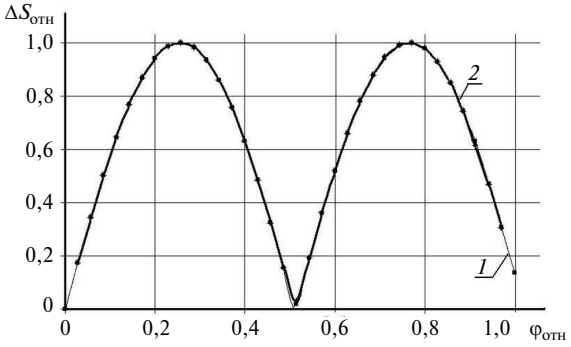


Рис. 2. Сравнение расчетной (*1*) и экспериментальной (*2*) зависимостей величин взаимных смещений лопаток от углового расстояния между ними

Приведенные выше экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что необходимо рассмотреть более сложную автоколебательную систему, учитывающую взаимодействие лопаточного венца не только с обтекающим его потоком, но и, возможно, с потоком в камере отбора, а также вероятность одновременного возникновения автоколебаний нескольких лопаточных венцов. Естественно, что решение подобной задачи представляет очень большие вычислительные трудности, однако ее практическая важность несомненна, поскольку уже известны случаи, когда рассматриваемые автоколебания привели к усталостным повреждениям лопаток в условиях эксплуатации. Следует учитывать, что вероятность взаимодействия различных лопаточных венцов при автоколебаниях с синфазными собственными формами резко возрастает. Это связано с тем, что в этом случае суммарный момент и суммарный вектор усилий, передаваемый на ротор и поток от колеблющегося венца, не равен нулю (в отличие от дисковых форм). Кроме того, переход в новых турбинах к цельнокованым роторам вместо роторов с насадными дисками привел к увеличению взаимодействия синфазных колебаний различных лопаточных венцов через заделку.

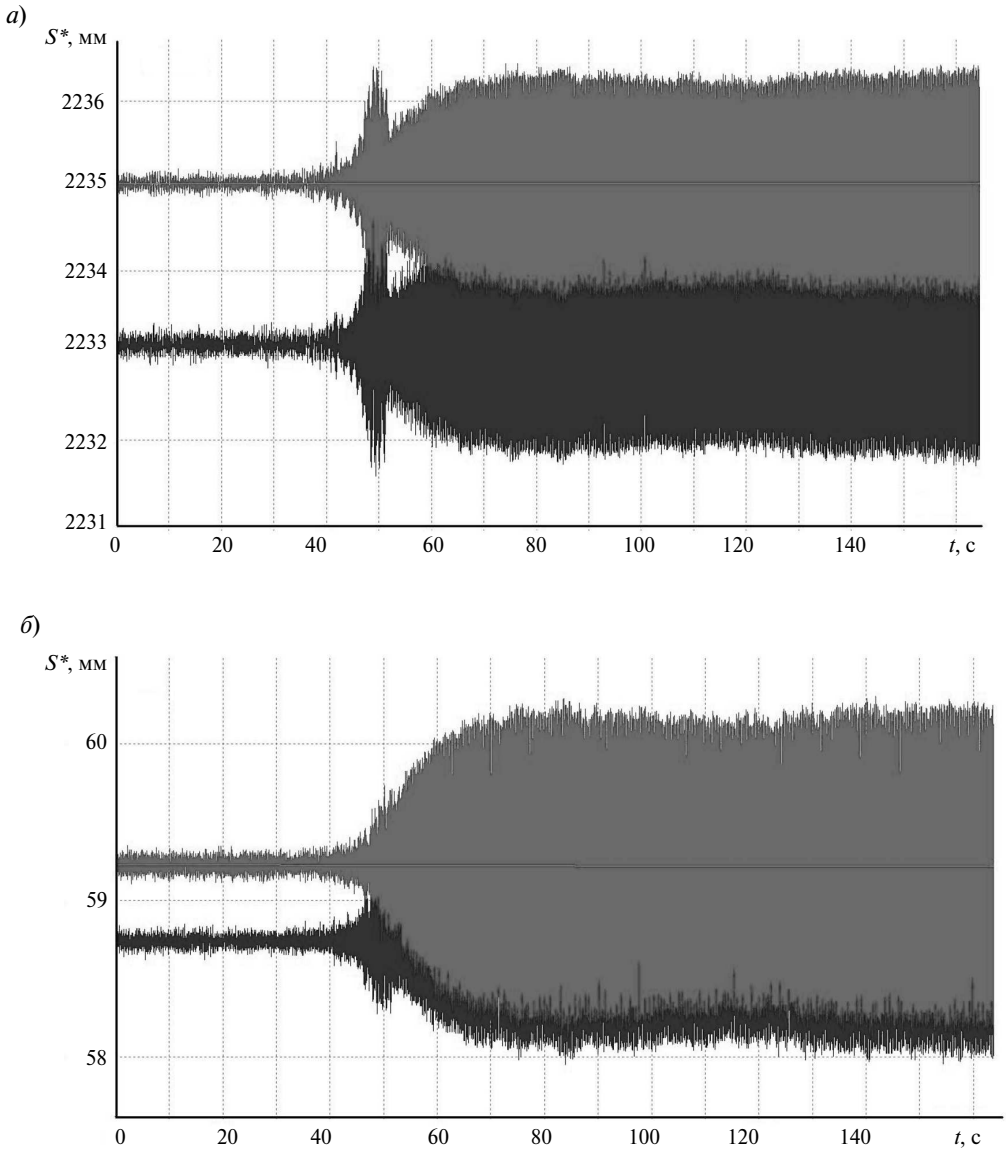


Рис. 3. Зависимость автоколебаний лопаток правого и левого потоков предпоследней (*а*) и последней ступени (*б*) от времени

Еще одна особенность рассматриваемых автоколебаний — это их возникновение или усиление интенсивности при переходных режимах работы турбины. В процессе эксплуатации выяснилось, что автоколебания могут возникнуть или их интенсивность существенно возрасти при переходных режимах работы турбоагрегата, несущего достаточно большую или номинальную нагрузку (улучшение или ухудшение вакуума в конденсаторе, отключение или включение подогревателя низкого давления, расположенного за предпоследней ступенью).

В качестве примера на рис. 4 показана зависимость интенсивности автоколебаний лопаток последней ступени в процессе отключения и включения подогревателя низкого давления.

В диапазоне от 0 до 130 секунд подогреватель был включен и происходили автоколебания небольшой интенсивности с $\Delta S \approx 0{,}3$–$0{,}4$ мм. В процессе отключения подогревателя интенсивность автоколебаний возросла до $\Delta S_{max} \approx 1$ мм, а после отключения они полностью прекратились. При включении подогревателя автоколебания появились, возросли до $\Delta S_{max} \approx 0{,}6$ мм при $t \approx 740$ с, а за-

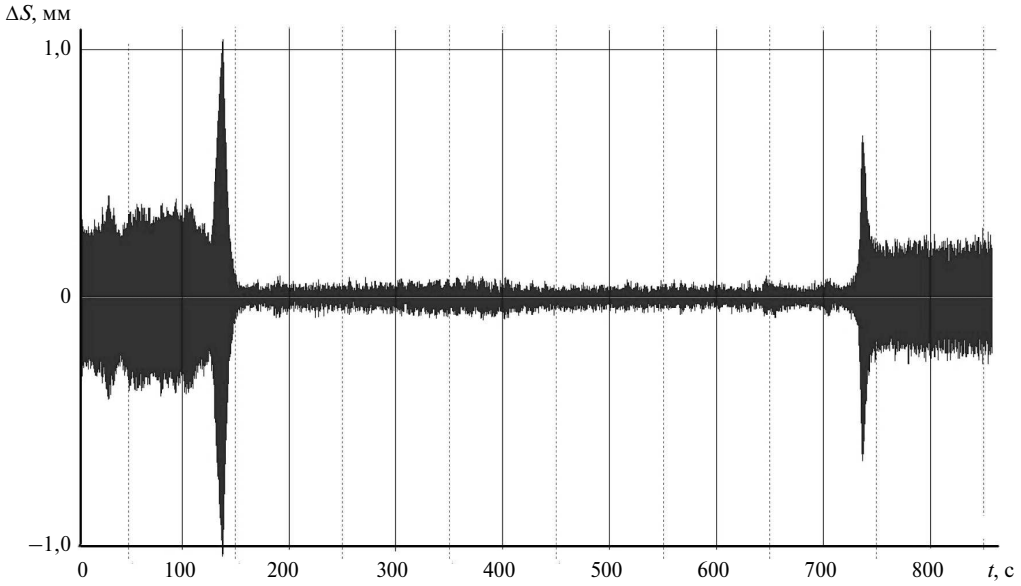


Рис. 4. Изменение интенсивности автоколебаний в процессе отключения и включения подогревателя низкого давления

тем уменьшились и стабилизировались на уровне $\Delta S \approx 0{,}25$ мм. Частота автоколебаний в течение всего процесса измерений оставалась неизменной и составляла около 115 Гц.

Подобная особенность, по всей вероятности, связана с тем, что система находится вблизи границы устойчивости, и поэтому даже небольшое увеличение сил, находящихся в фазе со скоростью, может привести к возникновению или увеличению интенсивности автоколебаний.

Зависимость распределенного усилия, действующего на элемент лопатки единичной высоты, при переходных режимах можно приближенно представить в виде

$$q(t) = q_0 + q_1 t, \qquad (8)$$

где величина q_1 (положительная или отрицательная) сохраняет свое значение примерно постоянным в процессе переходного режима при $0 \le t \le \Delta T$ (например, при отключении или подключении подогревателя низкого давления можно приближенно считать, что $q_1 \Delta T \approx 0{,}05 q_0$). Если прогиб лопатки в процессе автоколебаний изменяется по закону $A(t) = A\sin(2\pi ft + \alpha)$, а скорость — по закону $v(t) = 2\pi Af\cos(2\pi ft + \alpha)$, то работа переменной части паровой нагрузки для элемента лопатки единичной высоты будет равна

$$R_1 = 2\pi \int_0^{\Delta T} q_1 tAf \cos(2\pi ft + \alpha)\, dt. \qquad (9)$$

После интегрирования (9) получим

$$R_1 = q_1 A \Delta T \sin(2\pi f \Delta T + \alpha) + \frac{q_1 A}{2\pi f}[\cos(2\pi f \Delta T + \alpha) - \cos\alpha]. \qquad (10)$$

Начальный фазовый угол α следует выбрать таким образом, чтобы подведенная к лопатке энергия была максимальной. За счет выбора угла α и небольшого изменения величины ΔT (в пределах периода колебаний $1/f$) можно найти максимально возможную работу $R_{1\max}$ линейно изменяющейся во времени паровой нагрузки $q_1 t$:

$$R_{1\max} = q_1 \Delta T A + \frac{q_1 A}{2\pi f}. \qquad (11)$$

Поскольку выполняяется неравенство $\Delta E \gg 1/2\pi f$, то можно считать справедливой приближенную формулу

$$R_{1\max} \approx q_1 \Delta T A. \qquad (12)$$

Для вычисления суммарной работы переменной части паровой нагрузки необходимо величину $R_{1\max}$ проинтегрировать по высоте лопатки.

Величина $q_1 \Delta T$ не зависит от длительности интервала изменения нагрузки ΔT, т. к. определяется суммарным изменением нагрузки за весь переходный период. В связи с этим при фиксированной амплитуде колебаний подведенная энергия не будет зависеть от длительности пере-

ходного периода ΔT. Рассеянная за цикл энергия пропорциональна декременту и потенциальной энергии колеблющейся лопатки. Поэтому при увеличении ΔT рассеянная энергия также увеличивается и, значит, в меньшей степени будет возрастать интенсивность автоколебаний под действием линейно изменяющейся во времени нагрузки. Качественно аналогичные выводы могут быть получены и при условии, что в течение переходного периода не только нагрузка, но и амплитуда колебаний изменяются по линейному закону.

Естественно, что линейно изменяющаяся во времени нагрузка может поддерживать (или усиливать) не только автоколебания, но и кратные оборотам резонансные колебания. Фактически, однако, в связи с проведением вибрационной отстройки резонансные колебания на номинальных оборотах в исследовавшихся турбинах отсутствовали, а автоколебания имели место при определенных режимах.

Приведенные в статье экспериментальные данные свидетельствуют о том, что автоколебания лопаток последних ступеней мощных паровых турбин могут реализовываться не только с дисковыми, но и с синфазными собственными формами лопаточных венцов. Учитывая вероятные механизмы возбуждения колебаний и распределения амплитуд по высоте лопатки при собственных формах, с которыми они реализуются, можно рекомендовать наиболее целесообразные конструктивные мероприятия по борьбе с автоколебаниями.

Для борьбы с автоколебаниями, реализующимися в виде дисковых форм, как отмечалось в [3], эффективны следующие мероприятия: увеличение жесткости лопаток (например, за счет подобного увеличения размеров поперечных сечений); относительное уменьшение расхода и перепада в периферийных сечениях лопаточных венцов, т. к. именно в этих сечениях происходит наиболее интенсивный энергообмен между колеблющимися лопатками и потоком; увеличение конструкционного демпфирования.

Эти же мероприятия могут быть рекомендованы и для борьбы с автоколебаниями, реализующимися с синфазными собственными формами лопаточных венцов. В последнем случае дополнительный положительный эффект может быть достигнут за счет увеличения различий между частотами, соответствующими разным собственным формам лопаточных венцов соседних ступеней, и частотами высших собственных форм крутильных колебаний валопровода. Кроме того, достаточно эффективным может оказаться увеличение длительности рассмотренных выше переходных процессов. Необходимо выполнить аэродинамическую отработку камеры отбора, расположенной за предпоследней ступенью, и с целью повышения вибрационной надежности лопаток рассмотреть вопрос о целесообразности выполнения этого отбора перед предпоследней ступенью.

Все перечисленные выше конструктивные мероприятия желательно использовать уже при проектировании новых турбин, так как борьба с автоколебаниями, обнаруженными только в процессе пуско-наладочных работ на электростанциях, — достаточно сложная задача.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Заблоцкий, И.Е.** Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин [Текст] / И.Е. Заблоцкий, Ю.А. Коростелёв, Р.А. Шипов.— М.: Машиностроение, 1977.— 160 с.

2. **Патент РФ № 2063519.** Устройство для замера амплитуд колебаний рабочих лопаток турбомашин дискретно-фазовым методом [Текст] / К.Н. Боришанский, Б.Е. Григорьев, С.Ю. Григорьев [и др.].— БИ.— 1996. № 19.

3. **Боришанский, К.Н.** Колебания рабочих лопаток паровых турбин и меры борьбы с ними [Текст] / К.Н. Боришанский.— СПб.: Art-Xpress, 2011.— 324 с.

4. **Левин, А.В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А.В. Левин, К.Н. Боришанский, Е.Д. Консон.— Л.: Машиностроение, 1981.— 710 с.

БОРИШАНСКИЙ Константин Николаевич — *доктор технических наук, профессор кафедры турбиностроения и средств автоматики института машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195269, Санкт-Петербург, Россия
тел.(812)652-73-29
knb37@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 631.43

Ю.В. Галышев, А.Ю. Шабанов,
А.Б. Зайцев, А.А. Метелев

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТОПЛИВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

U.V. Galyshev, A.Y. Shabanov,
A.B. Zaitsev, A.A. Metelev

THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC EFFECTS ON PERFORMANCE AND CHARACTERISTICS OF MOTOR VEHICLE FUEL COMBUSTION ENGINES

В статье представлены результаты исследования влияния электромагнитного поля на параметры углеводородного топлива и изменение показателей работы натурных двигателей (бензинового ВАЗ-2111 и дизельного ЯМЗ-238) на обработанном топливе.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ. ТОПЛИВО.

The results of studies of the effect of electromagnetic field on the parameters of hydrocarbon fuel and change the performance of the full-scale engines (gasoline VAZ-2111 and diesel JAMZ-238) on the treated fuel.

ELECTROMAGNETIC FIELD. THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE. FUEL.

Существует возможность улучшения характеристик поршневых двигателей с помощью различных физических эффектов [5, 6]. Один из наименее изученных способов — воздействие на углеводородное топливо, поступающее в двигатель, электромагнитными импульсами специальной формы.

Известно достаточно много работ (к примеру, [3, 4, 7, 8]), посвященных направленному воздействию электромагнитных полей на свойства различных жидкостей (нефть, тяжелое печное топливо, автомобильные топлива, вода) . Основное направление применения подобных устройств в нефтехимической промышленности и энергетике — активизация сжигания тяжелых топлив в котлах и печах [3], а также при прокачке тяжелых нефтепродуктов через трубопроводы [8]. При этом наблюдается уменьшение степени загрязненности камер сгорания и трубопроводов, уменьшение дымности отработавших газов.

На кафедре двигателей внутреннего сгорания СПбГПУ имеется опыт испытания подобных устройств применительно к бензиновым и дизельным ДВС. Проведенные ранее исследования показали, что в результате электромагнитного воздействия возникали значимые изменения параметров углеводородного топлива, в ряде случаев приведшие к положительному влиянию на характеристики двигателей.

Цель настоящего исследования — определить количественные изменения физико-химических параметров (ФХП) углеводородного топлива и характеристик испытуемых двигателей, работающих на топливе, обработанном с помощью устройства «Молекулярный модификатор топлива» (сокращенно «ММТ»). Для достижения поставленной цели проведено экспериментальное исследование ФХП топлива до и после электромагнитной обработки устройством «ММТ». Проведена серия моторных испытаний двигателей при работе на базовом топливе и топливе после обработки. Испытания проводились в лаборатории кафедры ДВС СПбГПУ на бензиновом двигателе ВАЗ-2111 [1]

и на автомобильном высокооборотном дизельном двигателе ЯМЗ-238.

Для исследования влияния электромагнитной обработки на ФХП автомобильных бензинов были использованы два топлива марки АИ-95-4 с существенно различным групповым составом, один из которых отличается высоким содержанием ароматических углеводородов (образец № 1), другой — высоким содержанием оксигенатов (образец № 2).

Оценка степени влияния электромагнитной обработки бензинов на их детонационную стойкость производилась путем определения согласно ГОСТ 8226–82 октанового числа (ОЧ) базовых бензинов и бензинов, прошедших через устройство «ММТ». Для подготовки образцов бензинов была создана специальная установка, в замкнутый контур которой вмонтировано испытуемое устройство. Прокачка топлива по контуру осуществлялась штатным электрическим топливным насосом. При этом интенсивность электромагнитной обработки могла варьироваться путем регулирования времени пребывания топлива в активной зоне устройства.

Результаты, полученные на этой стадии испытаний (табл. 1), показали устойчивую тенденцию к снижению ОЧ бензинов при их обработке устройством «ММТ».

Таблица 1

Измеренные значения октанового числа бензинов до и после обработки устройством «ММТ» (исследовательский метод)

Момент отбора пробы топлива	ОЧ топлива	
	Образец № 1	Образец № 2
До обработки	95,4	95,1
После обработки (10 с)	94,6	94,9
После обработки (30 с)	94,6	94,8
После обработки (60 с)	94,5	94,8

Отмеченный на испытаниях факт снижения детонационной стойкости может быть объяснен развитием процессов активации топлива с образованием радикалов углеводородов за счет разрыва молекулярных связей в топливе. Важно и то, что степень активации топлива практически не зависит от времени его пребывания в активной зоне устройства. Это позволяет прогнозировать сохранение эффективности работы устройства на различных скоростных и нагрузочных режимах, характеризуемых соответствующими расходами топлива через устройство. Также необходимо отметить, что уменьшение ОЧ более заметно для бензина, содержащего меньшее количество оксигенатов.

Определение фракционного состава образцов топлива проводилось согласно ГОСТ 2177–99. Данные для сравнения фракционного состава до и после электромагнитной обработки бензинов сведены в табл. 2.

Полученные результаты показывают разнонаправленное влияние электромагнитной обработки на бензины различного группового состава. Так, для бензинов, не содержащих значительного количества оксигенатов, наблюдается некоторое улучшение испаряемости бензина и снижение остатка в колбе, что способствует улучшению качества смесеобразования. В то же время для бензина с высоким содержанием оксигенатов была отмечена обратная тенденция.

Причину подобного расхождения в результатах для различных образцов бензинов позволило выявить исследование влияния электромагнитной обработки топлива на его групповой состав, определение которого проведено в соответствии с ГОСТ Р 52714–2007. Эти данные сведены в табл. 3.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии некоторых общих тенденций изменения группового состава топлива при его электромагнитной обработке. Для обоих образцов бензинов наблюдалось выраженное увеличение доли содержания ароматических углеводородов, более заметное у второго образца бензина (с высоким содержанием оксигенатов). Этот рост близок к полученному уменьшению содержания оксигенатов (в первую очередь — спиртов) в топливе. При этом для обоих образцов топлива было зафиксировано определенное увеличение содержания олефиновых углеводородов, что также подтверждает наличие активации топлива при его электромагнитной обработке.

Различия в тенденциях изменения испаряемости топлива для бензинов с разным групповым составом, по всей видимости, можно объяснить следующим образом. Хорошая испаряемость бензина с высоким содержанием оксигенатов, очевидно, определяется достаточным количеством

Таблица 2

Показатели фракционного состава бензинов до и после обработки устройством «ММТ»

Параметр*	Значения показателей			
	Бензин № 1		Бензин № 2	
	До обработки	После обработки	До обработки	После обработки
t_1, °С	46	41	38	38
t_{10}, °С	67	61	48	52
t_{30}, °С	86	81	66	72
t_{50}, °С	108	104	99	102
t_{70}, °С	132	131	131	133
t_{90}, °С	169	165	167	169
$t_{кк}$, °С	193	192	191	195
Остаток в колбе, %	2	1	2	3

*Примечание: t_1^* — температура падения первой капли топлива при перегонке; t_{10}, t_{30} и т. д. — температуры перегонки 10, 30 и т. д. процентов топлива; $t_{к\,к}$ — температура конца кипения.

Таблица 3

Показатели группового состава бензинов до и после обработки устройством «ММТ»

Группа углеводородов	Содержание углеводородов, % об.			
	Образец № 1		Образец № 2	
	До обработки	После обработки	До обработки	После обработки
Н-алканы	8,68	8,59	10,56	9,82
Изо-алканы	38,33	38,26	39,17	39,34
Ароматические	32,11	32,64	28,94	31,01
Нафтены	5,42	5,44	4,62	4,78
Олефины	9,89	9,47	4,72	6,38
Оксигенаты, из них:	2,73	2,78	9,89	6,40
МТБЭ	2,45	2,31	2,61	2,41
Метанол	–	–	6,71	4,06
Пропанол	–	–	0,87	0,47

легких углеводородов алканового ряда, входящих в его состав. Уменьшение содержания кислородосодержащих компонент после электромагнитной обработки приводит к увеличению содержания ароматики и ухудшению испаряемости топлива. В то же время не наблюдается увеличения содержания легких алкановых углеводородов здесь. У образца бензина № 1, где отсутствуют оксигенаты, работает только тенденция изменения углеводородного состава, улучшающая испаряемость.

Таким образом, поставленными в данной работе исследованиями ФХП бензинов доказаны изменения в составе и свойствах топлива при его электромагнитной обработке. Эти изменения, в свою очередь, должны определенным образом отразиться на технико-экономических и экологических показателях двигателей, в которых

используется топливо, прошедшее электромагнитную обработку, что нашло подтверждение при проведении стендовых испытаний на полноразмерных двигателях различного типа.

Так, при проведении цикла сравнительных испытаний бензинового впрыскового двигателя ВАЗ-2111 были получены значимые эффекты повышения мощности и топливной экономичности. Некоторые результаты этого фрагмента исследования представлены на рис. 1 и 2.

Усредненный за цикл испытаний (по 24 точкам замера) эффект прироста мощности составил 1,5–2,5 %, снижение удельного расхода топлива — от 2,4 до 4,2 %. При этом повышение топливной экономичности двигателя более выражено в зоне режимов с малыми нагрузками и холостого хода, преобладающими в городском цикле эксплуатации легкового автомобиля.

Следует также отметить существенное влияние электромагнитной обработки топлива на снижение содержания остаточных углеводородов (CH) в отработавших газах. Средний за цикл испытаний эффект уменьшения CH составил от 8 до 15 % в зависимости от группового состава топлива (рис. 3). В то же время существенного изменения содержания оксидов углерода (CO) и азота (NO_x), электромагнитная обработка топлива не дала.

Был поставлен цикл длительных испытаний двигателя ВАЗ-2111 с целью оценки влияния электромагнитной обработки топлива на изменение уровня отложений в камере сгорания. Испытания длительностью 30 моточасов проводились при работе двигателя на базовом бензине и бензине, прошедшем электромагнитную обработку устройством «ММТ».

В процессе длительных испытаний исследовалась динамика изменения параметров работы двигателя при использовании топлива, прошедшего электромагнитную обработку, а также изменение уровня загрязненности камеры сгорания после цикла испытаний [1, 9]. В качестве контрольных весовых элементов использовались свечи зажигания, впускные и выпускные клапаны двигателя.

По результатам испытаний было показано, что уровень отложений на контрольных весовых элементах при использовании бензина, активированного посредством электромагнитной обработки, заметно уменьшился по сравнению с контрольным циклом испытаний. Так, на свечах зажигания масса отложений, сформированных за цикл испытаний, уменьшилась в среднем

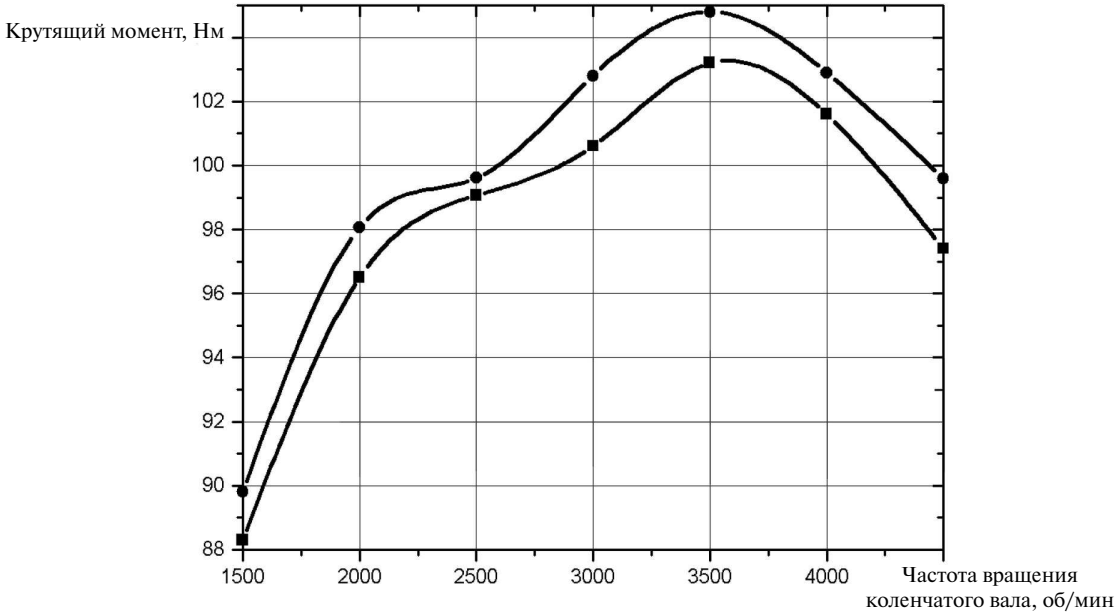


Рис. 1. Влияние электромагнитной обработки топлива на выходной крутящий момент двигателя при его работе по внешней скоростной характеристике (—■— — базовый бензин (образец № 1); —●— после обработки устройством «ММТ»)

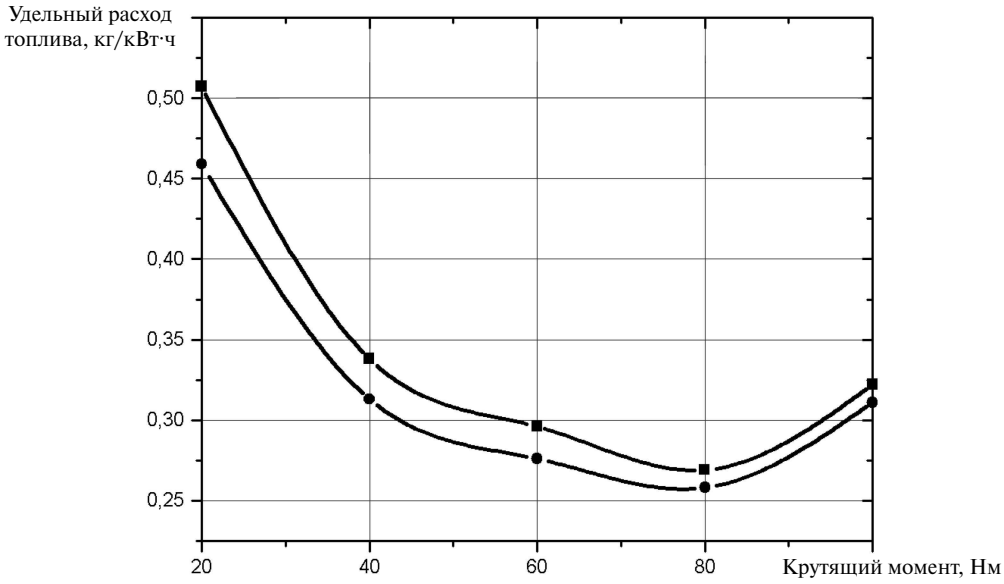


Рис. 2. Влияние электромагнитной обработки на удельный расход топлива при работе двигателя по нагрузочной характеристике (—■— — базовый бензин (образец № 1); —●— — после обработки устройством «ММТ»)

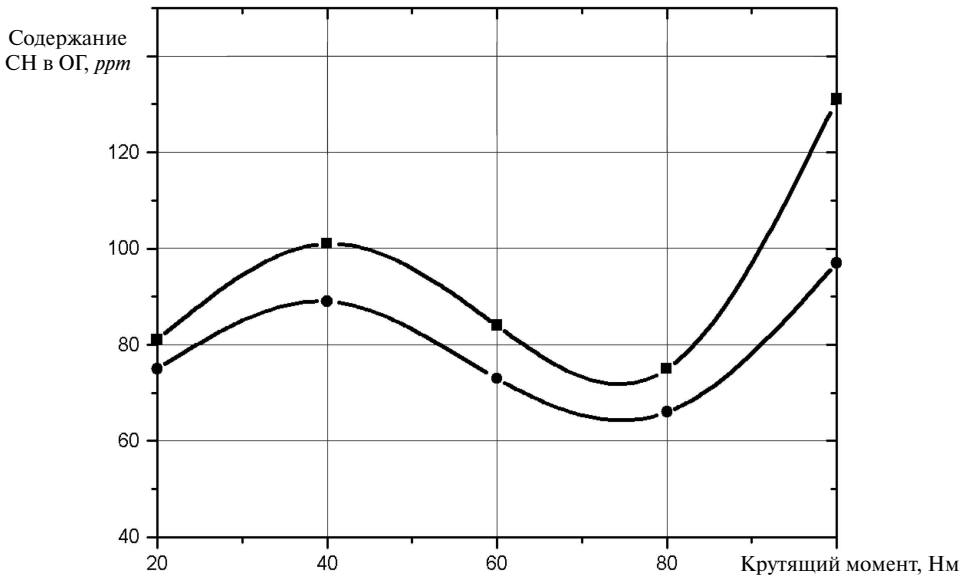


Рис. 3. Влияние электромагнитной обработки топлива на содержание остаточных углеводородов CH в отработавших газах при работе двигателя по нагрузочной характеристике (—■— — базовый бензин (образец № 1);—●— — после обработки устройством «ММТ»)

на 35 %, на клапанах — на 30–40 %. Эти результаты коррелируют с установленным ранее фактом положительного влияния электромагнитной обработки топлива на снижение остаточных углеводородов СН. Кроме того, имеются многочисленные аналогичные результаты, свидетельствующие о существенном повышении чистоты поверхностей камер сгорания и газопроводов отходящих газов при использовании устройства «ММТ» в стационарных теплогенерирующих установках.

В целом динамика изменения параметров двигателя при использовании устройства электромагнитной обработки топлива сходна с той, которая наблюдается на начальном этапе работы двигателя на бензинах, содержащих моющие присадки. В начальный период наблюдается некоторое кратковременное ухудшение параметров работы по компоненте СН, рост расхода топлива, после чего начинается положительная динамика изменения этих показателей. Итоговые показатели двигателя после длительного цикла испытаний при работе на активированном топливе превышают показатели, приведенные выше. Так, в нашем случае по итогу тридцатичасового цикла испытаний снижение усредненного удельного расхода топлива превысило 6 %.

Аналогичные результаты были получены и при испытаниях дизельного двигателя ЯМЗ-238. Основные эффекты составили около 3 % по удельному расходу топлива и более 20 % по дымности отработавших газов.

Таким образом, проведенными исследованиями доказано наличие изменения состава и базовых физико-химических показателей топлива в процессе его электромагнитной обработки устройством «Молекулярный модификатор топлива». Эти изменения приводят к улучшению качества смесеобразования и сгорания как в бензиновых, так и в дизельных ДВС. Однако очевидно, что для уточнения механизма влияния активации топлива электромагнитным воздействием на показатели работы двигателей требуются более детальные исследования, включая исследование процессов смесеобразования и сгорания, для чего необходимо провести индицирование цилиндров ДВС различных типов при их работе на различных видах топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Галышев, Ю.В.** Методика ускоренных испытаний моторных масел на изменение их свойств в течение срока эксплуатации [Текст] / Ю.В. Галышев, А.Ю. Шабанов, А.Б. Зайцев, А.А. Метелев // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 2–1(147).— С. 71–76.

2. **Галышев, Ю.В.** Топливные проблемы транспортной энергетики [Текст] / Ю.В. Галышев, Л.Е. Магидович, В.В. Румянцев.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005.— 236 с.

3. **Звонов, В.А.** Влияние на рабочий процесс ДВС активированного топлива внешних физических воздействий [Текст] / В.А. Звонов, Н.А. Макаров // Двигатели внутреннего сгорания.— 2008. № 2.— С. 112–121.

4. **Инюшин, Н.В.** Аппараты для магнитной обработки жидкостей [Текст] / Н.В. Инюшин, Е.И. Ишемчужин, Л.Е. Каштанова.— М.: Недра, 2001.— 144 с.

5. **Картошкин, А.П.** Оценка возможности модернизации морально устаревшей автотракторной техники [Текст] / А.П. Картошкин, С.К. Корабельников // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.— 2009. № 16.— С. 169–172.

6. **Кукис, В.С.** Перспективы улучшения характеристик двигателей Стирлинга [Текст] / В.С. Кукис, М.И. Куколев, А.И. Костин, В.С. Дворцов, Г.А. Ноздрин, А.Ю. Абакшин // Двигателестроение.— 2012. № 3.— С. 3–6.

7. **Микипорис, Ю.А.** Улучшение экологических показателей автомобильных двигателей электромагнитной обработкой топлива [Текст]: Учебное пособие / Ю.А. Микипорис. — Ковров: Изд-во КГТА, 2008.— 168 с.

8. **Спиридонов, Р.В.** Магнитная обработка жидкостей в нефтедобыче [Текст] / Р.В. Спиридонов, С.А. Демахин, А.Ю. Кивокурцев.— Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж».— 2003.— 136 с.: ил.

9. **Шабанов, А.Ю.** Влияние некоторых физико-химических показателей моторного масла на технико-экономические и ресурсные показатели поршневых бензиновых двигателей [Текст] / А.Ю. Шабанов, А.Б. Зайцев, И.С. Кудинов, А.А. Метелев // Двигателестроение.— 2011. № 1.— С. 24–28.

ГАЛЫШЕВ Юрий Витальевич — *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей, автомобилей и гусеничных машин института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
8-(812)-552-77-85
galyshev57@yandex.ru

ШАБАНОВ Александр Юрьевич — *кандидат технических наук, профессор кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812)-552–85–80
aush2003@mail.ru

ЗАЙЦЕВ Алексей Борисович — *кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
8-(812)-552-85-80
abzaytsev@mail.ru

МЕТЕЛЕВ Андрей Александрович — *аспирант кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, магистр техники и технологии.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
+7-905-219-83-82
petmet@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 62-50

А.Г. Батухтин, М.В. Кобылкин

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГРУПП ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

A.G. Batuhtin, M.V. Kobylkin

AUTOMATED CONTROL SYSTEM COOLANT FLOW FOR HEAT GROUP CONSUMER

В статье рассмотрена автоматизированная система, позволяющая регулировать теплопотребление групп потребителей без установки полного комплекта устройств автоматики на каждом потребителе. Представлена схема и принцип работы системы, дана оценка эффективности системы на примере группы зданий Забайкальского государственного университета, а также рассмотрена возможность применения системы для регулирования больших групп потребителей.

РЕГУЛИРОВАНИЕ. ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ. ТЕМПЕРАТУРА. РАСХОД. ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ.

The article describes an automated control system to regulate the heat demand of consumer groups without having to install a complete set of automation devices on each consumer. A scheme and the principle of the system, evaluate the effectiveness of the example of building the Zabaikalsky State University, and is also considered the possibility of using the system to control large groups of consumers.

REGULATION. HEAT. TEMPERATURE. FLOW. HEAT TRANSFER FLUIDS.

В развитии энергетики все большее значение получают технологии, направленные на оптимизацию уже имеющихся технологических решений по энергосбережению. Такой подход обусловлен как политической стратегией развития энергетики России, что отражено в федеральном законе № 261–ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», так и конкуренцией существующих систем централизованного теплоснабжения в силу современных рыночных отношений в энергетике. Особенно актуально встает вопрос о повышении конкурентоспособности существующих ТЭЦ как основы теплофикации РФ. Сложная экономическая ситуация и отсутствие свободных финансовых ресурсов у генерирующих компаний определяет необходимость изыскивать малозатратные методы энергосбережения [1].

Разработано множество способов оптимизации отпуска тепловой энергии от ТЭЦ потребителям с учетом особенностей функционирования тепловых сетей как в системах с открытым водоразбором на нужды горячего водоснабжения (ГВС) [2, 3], так и с закрытым [4, 5].

Прогрессирующее развитие техники, в том числе электроники, способствовало развитию сложных систем автоматического регулирования (САР). Современная система автоматического регулирования обладает рядом преимуществ, которых было затруднительно добиться в начале прошлого века, когда централизованное теплоснабжение становилось. В настоящее время одно из главных достоинств САР — возможность реализации сложных законов автоматического регулирования. Кроме того, в большинство стандартных систем заложена возможность перепрограммирования, т. е. изменения законов регулирования и управления системой [6]. В таких условиях приобретают значительную актуальность автоматизированные системы регулирования, позволяющие минимизировать теплопотребление, создавая при этом комфортные температурные условия для потребителей.

Существующие автоматизированные системы способны максимально точно отслеживать

множество параметров как теплоносителя, так и воздуха внутри помещений и за пределами здания, и, как следствие, регулировать теплопотребление на достаточно высоком уровне. Однако подобные системы включают в себя большое количество элементов, установка которых необходима на каждом потребителе системы, вследствие чего основной недостаток таких систем — это значительные затраты (капитальные и на обслуживание при внедрении автоматики для группы потребителей).

Для решения проблемы затрат на оборудование предлагается внедрять автоматизированные системы регулирования расхода теплоносителя для теплоснабжения групп потребителей (рис. 1.). В такой САР полный комплект автоматики устанавливается только на потребителе с максимальной тепловой нагрузкой (автоматизированный потребитель), на остальных потребителях системы (неавтоматизированные потребители) устанавливают только датчики температуры внутреннего воздуха и датчики расхода теплоносителя.

Система работает следующим образом. При заметном изменении параметров окружающей среды, когда появляется необходимость повышения тепловой нагрузки потребителей, ТЭП *4* дает сигнал на регулятор расхода *8* для повышения расхода теплоносителя, идущего к автоматизированному потребителю *2*. Это позволяет поддерживать заданную температуру внутреннего воздуха автоматизированного потребителя *2*, в то же время неавтоматизированный потребитель *3* начинает испытывать дефицит тепловой энергии, что приводит к постепенному снижению его температуры внутреннего воздуха, отслеживаемое датчиком *11*. При снижении температуры внутреннего воздуха неавтоматизированного потребителя *3* до нижнего установленного предела ТЭП *4* дает сигнал регулятору расхода *8* на снижение расхода теплоносителя для автоматизированного потребителя *2*, что приводит к увеличению расхода неавтоматизированного потребителя *3* за счет увеличения напора в теплосети. Снижение расхода автоматизированного потребителя производится до тех пор, пока расход неавтоматизированного потребителя *3* не достигнет минимального необходимого значения $G_{\min н}$, которое определяют следующим образом:

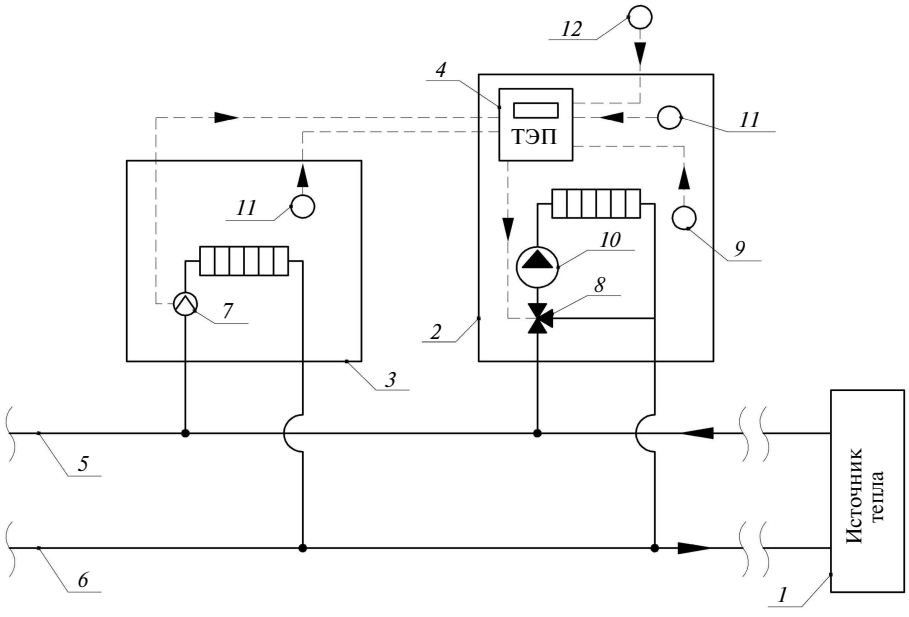


Рис. 1. Автоматизированная система регулирования расхода теплоносителя:

1 — источник тепла; *2* — автоматизированный потребитель; *3* — неавтоматизированный потребитель; *4* — теплоэнергопроцессор (ТЭП); *5* — подающий трубопровод; *6* — обратный трубопровод; *7* — датчик расхода теплоносителя; *8* — регулятор расхода теплоносителя; *9* — комплекс датчиков автоматизированного потребителя; включающий в себя датчики расхода; температуры и давления теплоносителя; *10* — циркуляционный насос; *11* — датчик температуры внутреннего воздуха; *12* — датчик температуры наружного воздуха

$$G_{\min н} = \frac{Q1000}{c(t_{под} - t_{обр})},\ т/ч,$$

где Q — текущее теплопотребление здания, Гкал/ч; c — теплоемкость теплоносителя, ккал/(кг·°С); $t_{под}$ — текущая температура в подающем трубопроводе, °С; $t_{обр}$ — текущая температура в обратном трубопроводе, °С.

Текущее теплопотребление здания определяется так:

$$Q = Q_{расч}\frac{t_в^р - t_н}{t_в^р - t_н^р},\ Гкал/ч,$$

где $Q_{расч}$ — расчетное теплопотребление здания, Гкал/ч; $t_в^р$ — расчетная температура внутреннего воздуха, °С; $t_н^р$ — расчетная температура наружного воздуха, °С; $t_н$ — текущая температура наружного воздуха, °С.

Текущее значение температуры $t_н$ отслеживается ТЭП *4* при помощи датчика *12*; текущие значения температур $t_{обр}$, $t_{под}$ — при помощи комплекса датчиков *9*.

При помощи датчика расхода *7* ТЭП *4* отслеживает изменение расхода на неавтоматизированного потребителя, после достижения значения расхода равного $G_{\min н}$, ТЭП *4* перестает подавать сигнал на регулятор расхода *8*, тем самым стабилизируя систему; после чего начинается прогрев неавтоматизированного потребителя *3*, а автоматизированный потребитель *2* постепенно охлаждается, расходуя аккумулированное тепло. Как только температура внутреннего воздуха неавтоматизированного потребителя *3* достигнет верхнего установленного предела или температура внутреннего воздуха автоматизированного потребителя *2* опустится до нижнего установленного предела, ТЭП *4* возвращает систему в исходное состояние.

Таким образом, циклы перераспределения расходов дают возможность соблюсти температурный режим подключенных к тепловым сетям потребителей без установки дополнительных устройств регулирования, что позволяет экономить капитальные затраты на установку устройств автоматики и затраты на их обслуживание.

Поскольку принцип работы схемы основан на гидравлических зависимостях в тепловых сетях, то на нее накладывается ряд ограничений в использовании. Так для сетей с «хорошей» гидравликой данный метод будет малоэффективным в связи со слабой зависимостью между расходом теплоносителя и перепадом давления в теплосети. Однако особую актуальность схема принимает для тупиковых сетей с ухудшенными гидравлическими показателями, что можно показать на примере зданий Забайкальского государственного университета.

В составе Забайкальского государственного университета имеются два здания, расположенные на одном ответвлении от магистральной тепловой сети, с нагрузками 1,2 и 0,3 Гкал/ч соответственно для первого и второго здания. После проведения мероприятий по автоматизации первого здания было замечено, что при увеличении нагрузки на первом здании, второе здание начинает испытывать дефицит тепловой энергии, в связи с чем был предложен проект автоматизации второго здания для сокращения полученного дефицита (стоимость проекта — порядка 900 тыс. руб.).

В ходе экспериментов было установлено, что при существующих гидравлических условиях и при расчетных параметрах изменение расхода теплоносителя у первого потребителя на 8 т/ч приводит к изменению расхода у второго потребителя в среднем на 1 т/ч, что при соответствующих нагрузках дает большой диапазон для регулирования, тем самым позволяя внедрить описанную выше схему. Причем стоимость модернизации существующей схемы, при которой первое здание уже имеет полный комплекс автоматики, составляет около 20 тыс. руб. Таким образом, внедрение данной автоматизированной системы регулирования позволит сократить капитальные затраты на 97,7 % от первоначальной стоимости проекта.

Помимо локального использования системы для конкретных зданий, вышеизложенный принцип регулирования может быть осуществлен и в более широких рамках. Так, в условиях современной городской застройки к сетям централизованного теплоснабжения присоединяются не только единичные здания с автоматизированной системой отопления, но и микрорайоны, состоящие из десятков зданий, обладающих современной автоматикой. Работа автоматики таких микрорайонов во многих случаях оказывает достаточно сильное гидравлическое влия-

ние на остальных потребителей системы, находящихся на большом расстоянии друг от друга, что может приводить к дефициту тепла в некоторых районах города. Принцип регулирования в подобном случае можно продемонстрировать на примере теплосетей города Читы.

К городским теплосетям (рис. 2.), источником тепла в которых служит ТЭЦ-1, подключен микрорайон Октябрьский с общей тепловой нагрузкой $Q_{\text{расч}}$ = 14 Гкал/ч, обладающий комплексной системой автоматики с единым центром управления для всего микрорайона. При регулировании нагрузки в масштабах микрорайона неизбежно значительное изменение расходов в теплосетях города, а с учетом их протяженности такое регулирование приводит к изменению располагаемого напора у остальных потребителей (особенно у концевых, с недостаточными напорами).

Первый этап, перед применением принципа автоматического регулирования групп потребителей, — определение района, на который будет оказываться наибольшее влияние вследствие изменения нагрузки в микрорайоне Октябрьский. Влияние микрорайона Октябрьский определяется на основании гидравлического расчета теплосети «ТЭЦ-1 — город» при переменной нагрузке на микрорайон. Поскольку число потребителей в системе теплоснабжения велико, гидравлический расчет целесообразно проводить с применением современных систем математического моделирования теплосетей. Создание максимально приближенной к реально существующим гидравлическим условиям математической модели теплосети «ТЭЦ-1 — город» позволило оценить и сравнить влияние изменения нагрузки микрорайона для всех потребителей системы. Согласно расчетам наибольшее влияние Октябрьский оказывается на микрорайон Сосновый бор с общей тепловой нагрузкой $Q_{\text{расч}}$ = 26,5 Гкал/ч, находящийся на удалении порядка восьми километров от Октябрьского. Причем изменение нагрузки Октябрьского на 50 % в сторону уменьшения или увеличения приводит к изменению располагаемого напора перед микрорайоном Сосновый бор в среднем на 20 % от расчетного значения, что указывает на сильную гидравлическую зависимость микрорайонов.

Следующий этап — установка датчика расхода перед микрорайоном Сосновый бор, а также установка датчиков температуры внутреннего воздуха в контролируемых зданиях и обеспечение связи между датчиками в Сосновом бору и единым контроллером в Октябрьском. Установка датчиков температуры внутреннего воздуха необязательна для всех зданий микрорайона, достаточно установить датчики на зданиях, находящихся в наихудших условиях. Таким образом, обеспечив теплом эти здания, мы заведомо обеспечиваем теплом остальные здания микрорайона. Выбор контролируемых зданий можно осуществить также исходя из расчетов с помощью математической модели.

После установки датчиков и создания связи между ними и контроллером становится возможным осуществление процесса регулирования расхода теплоносителя аналогично методу, описанному выше для группы зданий.

Использование взаимосвязей удаленных потребителей (автоматизированного и неавтоматизированного) г. Читы позволяет осуществлять

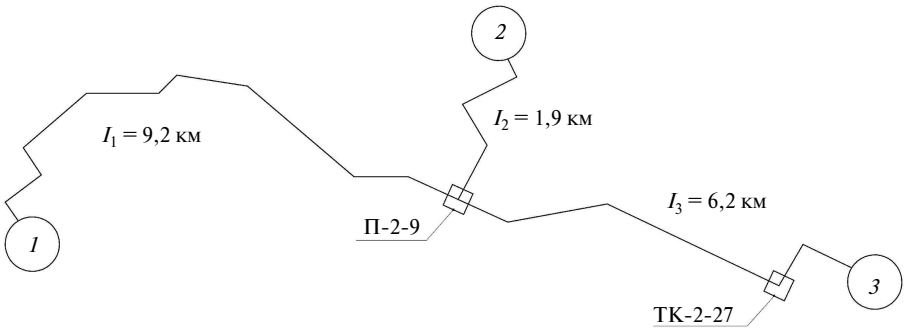


Рис. 2. Схематичное изображение теплосети «ТЭЦ-1 — город:
1 — источник тепла (ТЭЦ-1); 2 — мкр. Октябрьский; *3* — мкр. Сосновый бор

качественное теплоснабжение «проблемного» района теплопотребления. Применение периодического натопа с учетом неравномерности в течение суток влияния автоматики микрорайона Октябрьский на режим работы тепловой сети (6 часов вместо 24) позволяет экономить порядка 3369600 руб. за отопительный период.

В заключение можно отметить, что использование данной гидравлической зависимости на практике для таких крупных районов теплопотребления было вынужденной мерой (хотя и характеризовалось значительным экономическим эффектом). На основе выявленных тонких мест системы централизованного теплоснабжения был разработан ряд мероприятий для сокращения столь сильного влияния. В итоге в Сосновом бору (ТК-2–27) была установлена дополнительная насосная, а также произведена модернизация уже имеющейся. Таким образом, автоматизированная система регулирования расхода теплоносителя для теплоснабжения групп потребителей, являясь альтернативным решением, позволяет значительно экономить не только капитальные затраты, но и затраты на дальнейшее обслуживание.

Разработка энергоэффективных систем централизованного теплоснабжения проводится в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также гранта Президента РФ по поддержке молодых ученых, кандидатов наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Батухтин, А.Г.** Оптимизация отпуска теплоты от ТЭЦ на основе математического моделирования с учетом функционирования различных типов потребителей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Г. Батухтин / ВСГТУ.— Улан-Удэ:, 2005.— 16 с.

2. **Маккавеев, В.В.** Практическое применение некоторых методик оптимизации режимов отпуска теплоты [Текст] / В.В. Маккавеев, О.Е. Куприянов, А.Г. Батухтин // Промышленная энергетика.— 2008. № 10.— С. 23–27.

3. **Батухтин, А.Г.** Применение оптимизационных моделей функционирования систем теплоснабжения для снижения себестоимости тепловой энергии и увеличения располагаемой мощности станции [Текст] / А.Г. Батухтин, В.В. Маккавеев // Промышленная энергетика.— 2010. № 3.— С. 7–8.

4. **Маккавеев, В.В.** Математическая модель ряда абонентских вводов закрытых систем теплоснабжения [Текст] / В.В. Маккавеев, А.Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2009. № 3(84). — С. 200–207.

5. **Басс, М.С.** Комплексный подход к оптимизации функционирования современных систем теплоснабжения [Текст] / М.С. Басс, А.Г. Батухтин // Теплоэнергетика.— 2011. № 8.— С. 55–57.

6. **Батухтин А.Г.** Методы повышения эффективности и увеличения располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения [Текст] / А.Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.— 2010. № 1.— С. 189–192.

БАТУХТИН Андрей Геннадьевич — *кандидат технических наук, доцент, директор Технопарка Забайкальского государственного университета.*
672039, ул. Александро-заводская, г. Чита, 30 Забайкальский государственный университет, Россия
(3022) 41-70-85

КОБЫЛКИН Михаил Владимирович — *аспирант кафедры ТЭС Забайкальского государственного университета.*
672039, ул. Александро-заводская, г. Чита, 30 Забайкальский государственный университет, Россия
(3022) 41-70-85
mkchita@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.438. 001.2

К.Л. Лапшин

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ГАЗОВЫХ ТУРБИН СО СКОЛЬЖЕНИЕМ РОТОРОВ

K.L. Lapschin

FEATURES OF COMPUTER OPTIMIZATION OF GAS TURBINE FLOW AREAS WITH SLIDING OF ROTORS

Рассмотрены особенности математических моделей проектировочного газодинамического расчета газовой турбины со скольжением роторов в «жидких» и «твердых» меридианных обводах проточной части. Положения теории иллюстрируются примером компьютерной оптимизации двухвальной четырехступенчатой газовой турбины вертолетного двигателя.

ГАЗОВАЯ ТУРБИНА. ПРОТОЧНАЯ ЧАСТЬ. СКОЛЬЖЕНИЕ РОТОРОВ.

The mathematical models of the design gas-dynamic calculation of the gas turbine in «liquid» and «solid» meridian borders of area of the flow are considered. Sliding of the rotors is taken into account. Provisions of the theory are illustrated by the example of computer optimization of four stage dual rotor gas turbine of turboshaft engine for helicopter.

GAS TURBINE. FLOW AREA. SLIDING OF ROTORS.

Проточные части современных газовых турбин достигли высокой степени аэродинамического совершенства. Вместе с тем большие мощности и длительные сроки эксплуатации делают экономически оправданным за счет экономии топлива поиск возможностей увеличения даже на десятые доли процента КПД турбин. Обнаружить скрытые резервы повышения экономичности газовых турбин можно за счет разработки новых и совершенствования традиционных методов проектировочного газодинамического расчета, а также использования на этапе проектирования проточных частей методов компьютерной оптимизации.

Методы компьютерной оптимизации проточных частей газовых турбин с постоянной для рабочих лопаток всех ступеней частотой вращения ротора ($\omega = \text{const}$) рассмотрены в монографии [1]. Вместе с тем газовые турбины, предназначенные для привода компрессоров газоперекачивающих станций, а также транспортные, особенно авиационные, обычно состоят из двух (или более) каскадов, роторы которых не связаны механически и имеют различные частоты вращения ($\omega \neq \text{const}$). Ниже излагается подход к оптимизации проточных частей газовых турбин, состоящих из двух (или более) каскадов с различными частотами вращения (со скольжением роторов).

Традиционные методики проектировочного газодинамического расчета ступени осевой газовой турбины в одномерной постановке задачи в своей основе содержат разработки, выполненные еще А. Стодолой [2]. Обычно для расчета ступени в группе задают изоэнтропийный перепад энтальпий H_0, термодинамическую степень реактивности r_T, средние диаметры d_1, d_2 и высоты l_1, l_2 лопаточных венцов [3]. С помощью этих дополнительно заданных величин система уравнений для одномерного потока газа становится замкнутой, и задача проектировочного расчета ступени газовой турбины в «твердых», то есть известных, меридианных обводах проточной части приобретает решение [1, 3].

Сразу есть смысл отметить, что для традиционных методик начальный этап проектирования многоступенчатой газовой турбины не формализован, и поэтому приходится, опираясь на общие рекомендации по распределению рас-

полагаемых перепадов энтальпий между ступенями, выбрать количество ступеней, а затем плавными кривыми наметить меридианные обводы проточной части, вычислив приближенно диаметры и высоты лопаток первой и последней ступеней [3]. После чего становится возможным определить диаметры и высоты всех лопаточных венцов. А далее стандартный проектировочный газодинамический расчет газовой турбины ведется в далеких от совершенства и обычно требующих последующей коррекции «твердых» меридианных обводах проточной части [3].

Наиболее существенный недостаток традиционных методик заключается в том, что они разработаны для ручного счета и поэтому неудобны для использования в компьютерных расчетах при поиске оптимального варианта проточной части турбины. Задаваемые произвольно для каждой ступени перепады энтальпий H_0 и степени реактивности r_T не являются независимыми переменными. Поэтому для традиционных методик затруднено применение методов компьютерной оптимизации. Впрочем, замена переменных H_0 и r_T на давления в потоке p_1 и p_2 перед и за лопаточными венцами, являющиеся независимыми переменными, открывает возможность применения методов компьютерной оптимизации для проектировочного расчета газовой турбины в «твердых» меридианных обводах проточной части [1].

Следующий недостаток традиционных методик — неудобство, которое испытывает проектировщик при решении задач моделирования и унификации лопаточных венцов вновь проектируемых турбин с действующими. Как известно, конфигурация направляющих и рабочих лопаток тесно связана с углами $\alpha_2, \alpha_1, \beta_1, \beta_2$ потока. Для строгого кинематического моделирования, которое дает возможность использовать модельные и унифицированные ступени, в натуре и в модели следует обеспечить равенство углов потока $\alpha_2, \alpha_1, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ и отношения u_1/u_2. В этом случае, очевидно, пространственные треугольники скоростей (рис. 1) в натурной и модельной ступенях будут подобными. Добиться совпадения всех указанных величин для натурной и модельной ступеней при использовании традиционных методик довольно сложно. Поэтому в некоторых из них ограничиваются лишь равенством углов потока α_1, β_2 и отношения u_1/u_2 для натуры и модели, допуская несовпадение лопаточных и поточных углов $\alpha_{0л}$ и α_2, $\beta_{1л}$ и β_1, что приводит к появлению углов атаки и дополнительных потерь кинетической энергии при обтекании направляющих и рабочих лопаток и, в конечном счете, к снижению КПД турбинной ступени.

Рассмотрим основы принципиально новой методики проектировочного газодинамического расчета газовой турбины в «жидких», т. е. не заданных, меридианных обводах проточной части; в ней удалось избежать недостатков, присущих традиционным методикам. Для того чтобы получить решение системы уравнений одномерного потока [1], примем, что для каждой ступени турбины заданы углы потока $\alpha_2, \alpha_1, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ и окружные скорости u_1 и u_2, то есть известны треугольники скоростей. Впервые такой подход был предложен в статье [4] для паровых или газовых турбин с постоянной для рабочих лопаток всех ступеней частотой вращения ротора ($\omega = \text{const}$).

Если углы потока можно задавать для каждой ступени в определенной степени произвольно, опираясь на выполненные ранее успешные прототипы, то значения скоростей u_1 и u_2 следует вычислять согласно основному замыкающему соотношению проточной части многоступенчатой газовой турбины:

$$N_т = \sum_{i=1}^{n} N_i, \qquad (1)$$

где $N_т$ — заданная суммарная мощность всех каскадов турбины; n — количество ступеней; N_i — мощность i-й ступени;

$$N_i = G_i H_{ui}; \qquad (2)$$

G_i — массовый расход газа; H_{ui} — удельная мощность i-й ступени.

Используя формулу Эйлера [1] и теорему синусов для косоугольных треугольников скоростей (см. рис. 1), представим формулу (2) так:

$$N_i = G_i u_{2i}^2 \left(\frac{\sin\beta_1 \cos\alpha_1 (d_1/d_2)^2}{\sin(\beta_1 - \alpha_1)} - \right.$$
$$\left. - \frac{\sin\beta_2 \cos\alpha_2}{\sin(\beta_2 - \alpha_2)} \right)_i . \qquad (3)$$

Подставив (3) в (1), получим удобную для практического использования базовую формулу для проточной части многоступенчатой газовой турбины со скольжением роторов ($\omega \neq \text{const}$):

$$u_{2n} = \sqrt{\frac{N_т}{G_l \sum_{i=1}^{n} \left\{ \frac{G}{G_l} \left(\frac{d_2}{d_{2n}} \right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{2n}} \right)^2 \left[\frac{\sin\beta_1 \cos\alpha_1 \left(d_1 / d_2 \right)^2}{\sin(\beta_1 - \alpha_1)} - \frac{\sin\beta_2 \cos\alpha_2}{\sin(\beta_2 - \alpha_2)} \right] \right\}_i}}. \quad (4)$$

В формуле (4) u_{2n} — окружная скорость вращения рабочих лопаток последней ступени; G_1 — массовый расход рабочего тела на входе в первую ступень; G/G_1 — относительные расходы по ступеням, которые задаются предварительно, например из расчета системы охлаждения для газовой турбины; ω/ω_{2n} — относительные частоты вращения рабочих лопаток по ступеням, которые также задаются предварительно. Относительные диаметры d_1/d_2 и d_2/d_{2n} влияют на форму меридианных обводов проточной части и также должны быть заданы.

Формула (4) представляет собой основу аналитического решения задачи проектирования газовой турбины со скольжением роторов в «жидких» меридианных обводах проточной части.

Таким образом, если для каждой ступени турбины известны углы потока $\alpha_2, \alpha_1, \beta_1, \beta_2$ и отношения d_1/d_2, d_2/d_{2n} и ω/ω_{2n}, то из формулы (4) можно получить конкретное решение при проектировании проточной части газовой турбины. Вычислив из (4) u_{2n}, через заданные d_2/d_{2n}, d_1/d_2 и ω/ω_{2n} находим окружные скорости u_1 и u_2 для каждой ступени. Затем при

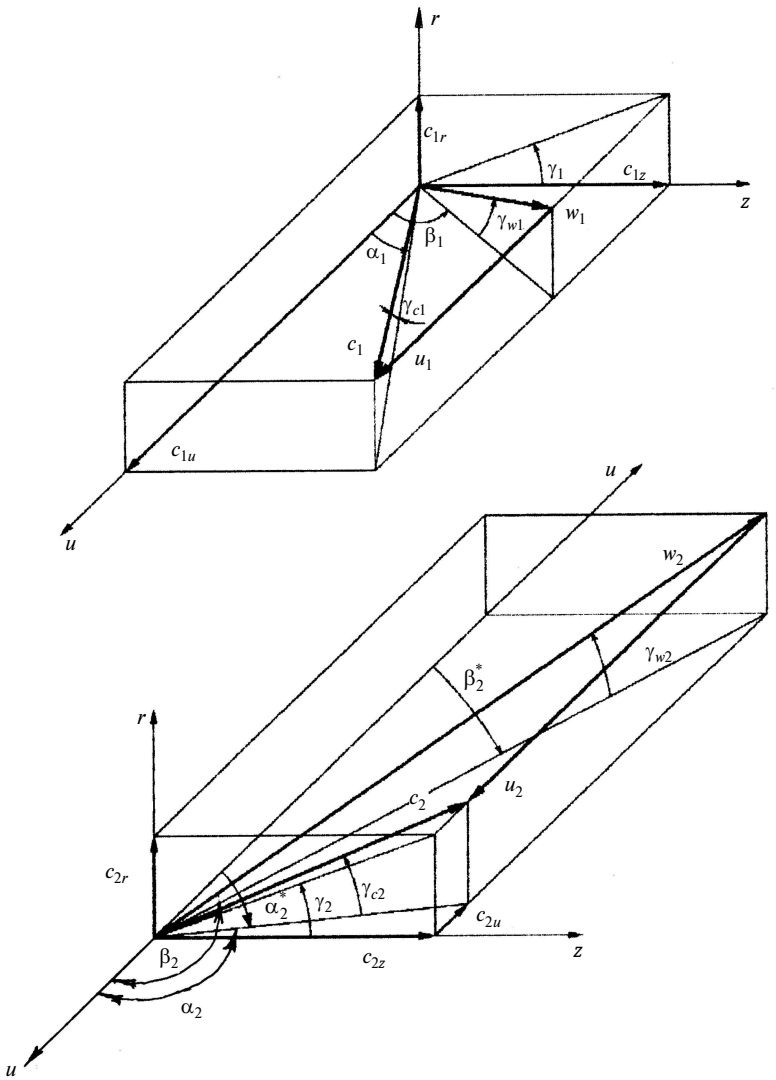


Рис. 1. Пространственные треугольники скоростей

известных углах $\alpha_2, \alpha_1, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ потока определяются скорости c_1, c_2, w_1, w_2 (см. рис. 1). Если на входе в турбину задать температуру T_0^* и давление p_0^* торможения, частоты ω вращения роторов каскадов, а также физические свойства рабочего тела (κ и R), то, выполняя последовательный стандартный газодинамический расчет [3] ступеней от первой к последней при известных треугольниках скоростей, можно определить диаметры d_1 и d_2 и высоты l_1 и l_2 лопаточных венцов. Таким образом, задачу одномерного проектировочного газодинамического расчета газовой турбины со скольжением роторов в «жидких» меридианных обводах проточной части в первом приближении можно признать решенной.

Приближенность решения связана с тем, что суммарная мощность $N_т$ турбины в соответствии с формулой (4) обеспечивается, но мощности каскадов могут отличаться от требуемых. Поэтому приходится методом вариантных расчетов, воздействуя на независимые переменные, добиваться выработки заданных мощностей и каскадами.

Основное достоинство предложенной методики в сравнении с традиционными заключается в том, что расчет проточной части газовой турбины даже на начальном этапе проектирования оказывается полностью формализованным и поэтому особенно удобным для компьютерного расчета. Задаваемые для каждой ступени углы потока $\alpha_2, \alpha_1, \beta_1, \beta_2$ представляют собой независимые переменные, значение каждой из которых можно варьировать в широких пределах. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно для корректной постановки и решения задач компьютерной оптимизации проточной части газовой турбины.

С другой стороны, предлагаемая методика весьма удобна для решения задач модернизации и унификации с действующими лопаточных венцов вновь проектируемых турбин. Если для всех ступеней проектируемой турбины задать те же значения $\alpha_2, \alpha_1, \beta_1, \beta_2, \gamma_{c1}, \gamma_{c2}$, ω/ω_{2n}, d_2, d_2/d_{2n} и ω/ω_{2n}, что и в турбине-прототипе, то получим структуру потока в проточной части, кинематически подобную прототипу. Это открывает широкие перспективы для моделирования и унификации лопаточных венцов. Отметим также, что правомерна постановка и решение смешанной задачи — оптимизации части ступеней (или даже венцов) при сохранении кинематического моделирования по остальным венцам турбины. Такой же подход к проектированию проточных частей развит и для осевых компрессоров [5].

Таким образом, предлагаемая методика проектировочного газодинамического расчета в «жидких» меридианных обводах проточной части — универсальна и дает возможность рассматривать задачи моделирования и унификации лопаточных венцов как частный случай общей задачи оптимизации проточной части газовой турбины со скольжением роторов.

Изложенный выше одномерный подход к проектированию в «жидких» меридианных обводах представляет собой стержень компьютерной программы оптимизации проточной части газовой турбины в двухмерной постановке задачи. Такую программу особенно уместно применять на первом этапе при новом проектировании, так как практически всегда можно использовать кинематику потока освоенной в производстве и проверенной в эксплуатации турбины-прототипа и сразу получать вполне удовлетворительное решение. Затем намеченная в первом приближении проточная часть газовой турбины обычно подвергается некоторой коррекции по соображениям технологичности и надежности.

На втором этапе проектирования целесообразно решить задачу компьютерной оптимизации лопаточных венцов газовой турбины в двухмерной постановке задачи в «твердых», т. е. заданных меридианных обводах проточной части, со скольжением роторов каскадов. В качестве независимых переменных можно использовать давления p_1 и p_2 в потоке перед и за лопаточными венцами, характер изменения углов α_1 потока за направляющими лопатками вдоль радиуса и распределения вдоль радиуса углов δ_1 и δ_2 тангенциального наклона направляющих и рабочих лопаток.

В качестве примера практического использования изложенных теоретических разработок рассмотрим некоторые итоги компьютерной оптимизации проточной части газовой турбины авиационного турбовального двигателя на номинальном режиме. Турбина имеет четыре ступени. Две ступени турбины высокого давления (ТВД) приводят в действие воздушный компрес-

сор, две ступени турбины низкого давления (ТНД) передают мощность воздушному винту вертолета. Каскады роторов ТВД и ТНД не связаны между собой механически, причем на режиме проектирования ротор ТНД вращается на 4,2 % медленнее, чем ротор ТВД.

На первом этапе применялись разработанные автором методика, алгоритм и компьютерная программа проектировочного газодинамического расчета газовой турбины со скольжением роторов ТВД и ТНД в двухмерной постановке задачи в «жидких» меридианных обводах проточной части. При этом использовалась кинематика потока высокоэкономичной и надежной вертолетной турбины-прототипа. В режиме диалога с персональным компьютером (ПК) была сформирована проточная часть исходного **варианта 1** турбины, схема которой представлена на рис. 2. При этом ТВД развивает мощность, необходимую для привода компрессора, а ТНД — достаточную для привода винта, при общем высоком уровне внутреннего КПД η всей турбины (см. табл.).

На втором этапе (варианты 2, 3 и 4) применялись разработанные автором методика, алгоритм и компьютерная программа проектировочного газодинамического расчета газовой турбины со скольжением роторов ТВД и ТНД в двухмерной постановке задачи в «твердых» меридианных обводах проточной части, определенных в варианте 1. В вариантах 2 и 3 в качестве целевой функции при оптимизации привлекался внутренний КПД η проточной части всей турбины. Давление p_{2n} за последней ступенью во всех вариантах расчета поддерживалось неизменным.

Вариант 2 получен в результате компьютерной оптимизации всей четырехступенчатой газовой турбины. Варьируемыми независимыми переменными служили давления p_1 и p_2 в потоке перед и за лопаточными венцами. Таким образом, поиск оптимального варианта выполнялся в семимерном пространстве варьирования независимых переменных. ПК с тактовой частотой 2,3 ГГц в течение двух секунд проанализировал 224 турбины и выбрал оптимальную турбину с максимальными внутренним КПД η и мощностью N. По сравнению с исходным вариантом 1 внутренний КПД η увеличился на 0,4 %, а суммарная мощность N турбины — на 12,6 кВт (см. таблицу). В то же время мощность $N_{\text{ТВД}}$ турбины высокого давления на 81 кВт больше требуемой (1607,7 кВт), а мощность $N_{\text{ТНД}}$ турбины низкого давления снизилась на 68,4 кВт (ΔN — см. в таблице). Вариант 2, хоть и оптимален, но не пригоден для практического применения, так как ТВД развивает излишнюю мощность, а ТНД не развивает необходимой мощности.

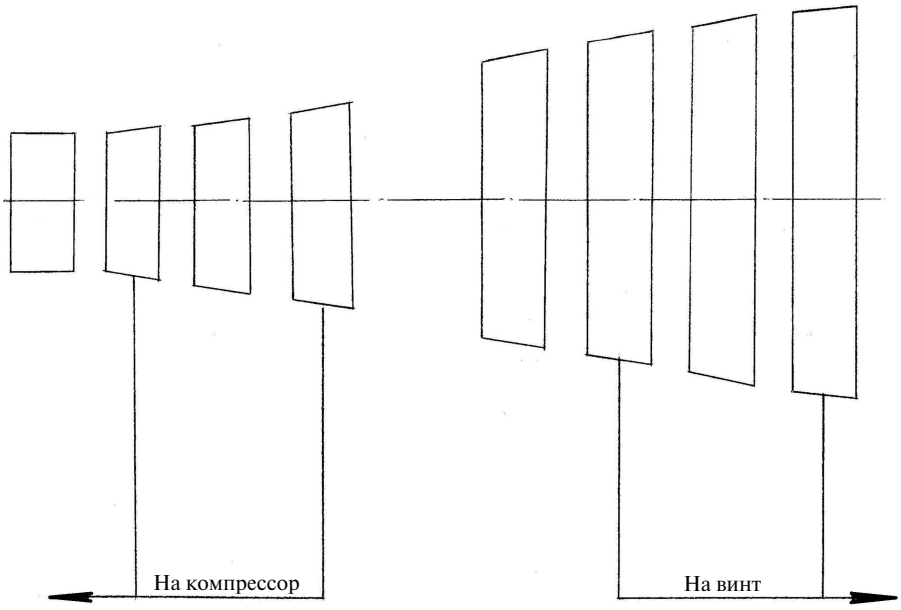


Рис. 2. Схема проточной части четырехступенчатой газовой турбины

Мощные показатели разных расчетных вариантов газовой турбины авиационного двигателя

Вариант	$N_{ТВД}$, кВт	$N_{ТНД}$, кВт	N, кВт	η	Δ N, кВт
1	1607,7	1556,4	3164,1	0,876	0
2	1688,7	1488,0	3176,7	0,880	–68,4
3	1607,7	1565,9	3173,6	0,879	9,5
4	1607,7	1562,7	3170,4	0,878	6,3

Поэтому был разработан **вариант 3** четырехступенчатой турбины, в котором мощность $N_{ТВД}$ турбины высокого давления соответствует заданной (см. табл.). При этом мощность $N_{ТНД}$ турбины низкого давления на 9,5 кВт превышает мощность исходного варианта 1. Вариант 3, как и вариант 2, получен в результате компьютерной оптимизации всей четырехступенчатой газовой турбины. Варьируемыми независимыми переменными служили давления p_1 и p_2 в потоке перед и за лопаточными венцами, но давление p_2 за ТВД при компьютерной оптимизации четырехступенчатой турбины не варьировалось. Результат оптимизации анализировался компьютером с точки зрения получения заданной мощности $N_{ТВД}$ турбины высокого давления. Если мощность $N_{ТВД}$ не соответствовала заданной, то давление p_2 за ТВД корректировалось компьютером, и вновь выполнялась оптимизация всей четырехступенчатой турбины. Таким образом, поиск оптимального варианта выполнялся в шестимерном пространстве варьирования независимых переменных. ПК в течение примерно одной секунды проанализировал 156 турбин и выбрал оптимальную турбину с максимальными внутренним КПД η и мощностью N. Данный вариант 3 турбины пригоден для практического применения, так как ТВД развивает заданную мощность, а ТНД — повышенную по сравнению с вариантом 1 мощность.

Вариант 4 получен в результате раздельной оптимизации турбин ТВД и ТНД. Сначала выполнялась компьютерная оптимизация ТВД. В качестве целевой функции привлекался внутренний КПД η^* проточной части ТВД по полным параметрам. За счет вариации давления p_2 за ТВД достигалась заданная мощность ТВД. Затем выполнялась компьютерная оптимизация ТНД. В качестве целевой функции привлекался уже внутренний КПД η проточной части ТНД. После этого по полученным в результате раздельной оптимизации оптимальным давлениям p_1 и p_2 в потоке перед и за лопаточными венцами был выполнен без оптимизации проектировочный газодинамический расчет проточной части всей четырехступенчатой турбины (вариант 4, см. табл.). Таким образом, поиск оптимальных вариантов ТВД и ТНД и, следовательно, всей турбины выполнялся в трехмерном пространстве варьирования независимых переменных. Вариант 4 турбины также пригоден для практического применения, так как ТВД развивает заданную мощность, а ТНД — повышенную по сравнению с вариантом 1 мощность, но все же вариант 3 предпочтительнее (см. ΔN в табл.). Это объясняется применением шестимерного пространства варьирования независимых переменных для поиска оптимального варианта всей турбины в варианте 3 по сравнению с трехмерным в варианте 4.

Таким образом, за счет использования двух оптимизационных программных комплексов — в «жидких» и «твердых» меридианных обводах проточной части — удается эффективно и в сжатые сроки решать проблему компьютерной оптимизации проточной части газовой турбины со скольжением роторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лапшин, К.Л.** Оптимизация проточных частей паровых и газовых турбин [Текст]: монография / К.Л. Лапшин.— СПб., 2011.— 177 с.

2. **Стодола, А.** Паровые турбины [Текст]: монография / А. Стодола.— СПб., 1904.— 254 с.

3. **Абианц, В.Х.** Теория авиационных газовых турбин [Текст]: монография / В.Х. Абианц;— СПб., 1979.— 246 с.

4. **Лапшин, К.Л.** О моделировании и оптимизации проточных частей тепловых турбин [Текст] / К.Л. Лапшин // Теплоэнергетика.— 1983. № 12.— С. 34–37.

5. **Лапшин, К.Л.** О приближенном моделировании проточных частей осевых компрессоров [Текст] / К.Л. Лапшин // Энергомашиностроение.— 1984. № 3.— С. 24–27.

ЛАПШИН Кирилл Леонидович — *доктор технических наук, профессор кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
(812)552-65-66
kirill.lapschin@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 620.92:621.1

М.С. Басс, А.Г. Батухтин, С.А. Требунских

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

M.S. Bass, A.G. Batuhtin, S.A. Trebunskikh

METHODOLOGICAL ISSUES FOR EVALUATING EFFECTIVENESS DISTRICT HEATING SYSTEMS

Оценка методов повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения возможна только на основе комплексного анализа, учитывающего взаимосвязь между физическими закономерностями производства и преобразования тепловой энергии и особенностями экономической эффективности инвестиций.

ЭНТРОПИЯ. ПРОИЗВОДСТВО ЭНТРОПИИ. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ. ОТОПЛЕНИЕ. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ.

The estimation of the methods of increasing to efficiency of the systems of the centralized supply possible only on base of the complex analysis, taking into account intercoupling between physical regularity production and transformations to heat energy and particularity to cost-performance investment.

ENTROPY. ENTROPY PRODUCTION. THERMAL ENERGY. HEATING. THERMODYNAMIC CYCLE.

Основная задача оценки энергетических процессов любых технических систем — это определение эффективности использования затраченной в них энергии. Наиболее часто в качестве критерия оценки эффективности используется отношение полезной энергии к затраченной, определяемое по балансам энергетических потоков и учитывающее потери в окружающую среду. Данный показатель рассчитывается только на основе закона сохранения энергии (чаще всего — его частного случая в форме первого закона термодинамики) и, как правило, носит название коэффициента полезного действия. В строгом смысле слова применять КПД имеет смысл только при преобразовании теплоты в работу. Но его используют и применительно к тепловым преобразованиям, например в теплообменных аппаратах, хотя в таких случаях корректнее говорить о коэффициенте преобразования энергии (КПЭ). Для исследования обратных циклов холодильных и теплонасосных установок используется коэффициент холодильной эффективности. Существенный недостаток балансового метода связан с невозможностью учесть ограничения, налагаемые вторым законом термодинамики. Этот недостаток хорошо известен, однако понятия КПД и КПЭ широко используются в науке и технике, так как эти критерии просты в применении, наглядны и, что немаловажно, локальны, т. е. позволяют рассчитать эффективность в какой-либо точке независимо от предыдущих и последующих процессов.

Все реальные процессы протекают неравновесно, поэтому для их адекватной оценки необходимо ориентироваться на закономерности термодинамики неравновесных процессов. Среди методов, позволяющих учесть неравновесность реальных процессов, наиболее часто используется эксергетический анализ. Существуют и методы, учитывающие изменение энтропии без явного выделения эксергии. Эти методы, как правило, нелокальны, не дают возможности определить эффективность процесса в любой точке, они позволяют вычислять только интегральный, итоговый результат по начальным и конечным параметрам. Кроме того, они рассматривают температуру окружающей среды как постоянную, хотя в реальности она может изменяться и во времени, и в пространстве в окрестности рассматриваемого объекта.

В формализме неравновесной термодинамики широко применяется концепция локального равновесия, что дает предпосылку для разработки локального критерия эффективности с учетом потерь на необратимость. Введенный в [1] критерий энтропийной эффективности

$$\eta = \frac{dN}{dS_{\max}} = 1 - \frac{dS}{dS_{\max}}, \qquad (1)$$

будучи локальным, дает возможность для определения эффективности теплофизического процесса в широком диапазоне граничных условий, в том числе и при нелинейном изменении параметров окружающей среды, в первую очередь — температуры. Критерий основан на представлении о текущем производстве энтропии (dS), максимально возможном в данных условиях производстве энтропии $(dS_{\max})$ и производстве негэнтропии $(dN = dS_{\max} - dS)$. Производство негэнтропии характеризует локальное поддержание параметров системы, отличных от параметров окружающей среды. Итоговый критерий энтропийной эффективности вычисляется суммированием производств негэнтропии и максимальной энтропии и отношением этих сумм:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\sum dN}{\sum dS_{\max}}. \qquad (2)$$

Применение данной концепции позволило получить критерии эффективности для различных теплопотребляющих объектов.

Для турбоустановок энтропийная эффективность равна

$$\frac{dN}{dS_{\max}} = \frac{\eta_T}{\eta_{TK}}, \qquad (3)$$

где η_T и η_{TK} — соответственно КПД реального цикла и термический КПД цикла Карно. Формула показывает, насколько близко реальный процесс приближается к идеальному прямому циклу Карно в том же диапазоне температур.

Холодильная установка или тепловой насос характеризуются сходным критерием:

$$\frac{dN}{dS_{\max}} = \frac{\xi_T}{\xi_{TK}}, \qquad (4)$$

где ξ_T и ξ_{TK} — холодильные коэффициенты соответственно реального обратного цикла и обратного цикла Карно. Подобно критерию, полученному для турбины, эта величина показывает, насколько близко реальный холодильный процесс приближается к идеальному обратному циклу Карно в том же диапазоне температур.

Применение коэффициента энтропийной эффективности термодинамически обосновывает отношение реального критерия эффективности к идеальному, которое позволяет сравнивать эффективность циклов установок, работающих в различных температурных диапазонах. Кроме того, появляется возможность оценить единым коэффициентом прямые и обратные циклы, что невозможно сделать в рамках концепции коэффициента полезного действия.

Объекты, преобразующие только тепловую энергию, также можно рассматривать с применением коэффициента энтропийной эффективности. Так, изучение особенностей производства энтропии в простом отапливаемом помещении, охлаждаемом наружным воздухом, позволило вывести коэффициент его энтропийной эффективности, численно равный

$$\frac{dN}{dS_{\max}} = \frac{1}{1 + \dfrac{R_{Q\text{б}}}{R_{Q\text{ст}}}}, \qquad (5)$$

где $R_{Q\text{б}}$ и $R_{Q\text{ст}}$ — полные термические сопротивления теплопередаче соответственно для батарей отопления и внешних ограждающих конструкций.

Применение концепции балансового КПД, как и КПЭ, для отапливаемых помещений не имеет смысла, поскольку вся подводимая теплота необратимо рассеивается в окружающую среду без совершения работы и без нагрева выводимого из системы теплоносителя. Предлагаемый энтропийный коэффициент позволяет не только численно выразить эффективность теплоснабжения через теплофизические свойства системы отопления и ограждающих конструкций, но и сравнить показатели эффективности разных построек с их собственными параметрами.

Простое отапливаемое помещение — частный случай теплообменника. Энтропийная эффективность теплообменной установки с изменением температур или фазовых состояний теплоносителей характеризуется общей формулой, одинаковой для прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей и любых значений температуры окружающей среды.

Значения энтропийной эффективности коррелируют со значениями, рассчитываемыми на основании классического эксергетического и предельного методов, повышаясь по мере увеличения площади теплообмена. Расчет по альтернативному методу эксергетического анализа дает противоположные результаты с уменьшением эффективности по мере роста площади теплообмена (см. рис.). Балансовый КПЭ в условиях хорошей термоизоляции, приближающейся к адиабатной, практически стремится к 100 %, слабо снижаясь с ростом внешней площади теплообмена.

Предлагаемый локальный подход позволяет освободиться от необходимости учитывать неравновесность при постоянной температуре окружающей среды. Для каждой точки можно учитывать местное значение внешней температуры, в общем случае нелинейно меняющейся в разных участках системы (например, температуры воздуха, воды и грунта в одно и то же время существенно различаются), с единственным условием соблюдения принципа локального равновесия.

Результаты, полученные при использовании различных термодинамических подходов, существенно противоречат друг другу, и на сегодняшний день нет общепринятого метода оценки термодинамической эффективности процесса. Кроме того, оценка мероприятий, направленных на модернизацию объектов энергетики, имеет ряд экономических особенностей, выходящих за границы применимости существующих методик термодинамического анализа. Поэтому наряду с термодинамической оценкой требуется разработать актуальные методы оценки технико-экономической эффективности объекта или мероприятия.

Проекты, направленные на повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения за счет внедрения энергоэффективных технологий и режимных мероприятий, могут способствовать достижению значительного экономического эффекта. При этом данные мероприятия могут потребовать значительных капитальных затрат и привести к изменению годовых эксплуатационных затрат, что определяет необходимость технико-экономической оценки данных мероприятий.

Согласно существующей нормативной базе для сравнения эффективности инвестиционных проектов рекомендуется использовать ряд основных показателей:

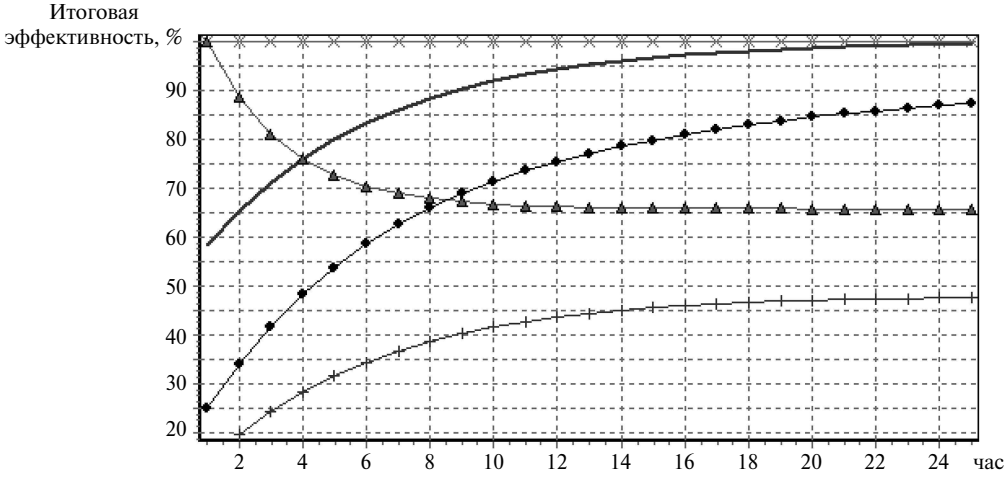
чистый дисконтированный доход (ЧДД), или интегральный эффект (Net Present Value — NPV);

индекс доходности — ИД (Profitability Index — PI);

внутреннюю норму доходности — ВНД (Internal Rate of Return — IRR);

срок окупаемости (Payback Period — PBP).

Все представленные выше экономические критерии в совокупности с условиями, которым



Сравнение различных значений интегральной эффективности прямоточного теплообменника при увеличении площади поверхности теплообмена (—×— — $КПЭ_{ТБ}$; ——— — $КПЭ_{ТП}$; —+— — $КПД_{экс\ кл}$; —▲— — $КПД_{экс\ некл}$; —●— — dN/dS_{max})

они должны удовлетворять, образуют систему для объективной количественной оценки экономической целесообразности инвестиционных проектов. При этом ни один из перечисленных критериев сам по себе не является достаточным для принятия проекта. Объективным критерием экономической целесообразности служит лишь одновременное выполнение всех условий. В отличие от экономической целесообразности, условие оптимальности какого-либо решения или проекта — достижение максимальной величины чистого дисконтированного дохода.

При рассмотрении экономической целесообразности мероприятий, направленных на повышение эффективности, необходимо придерживаться принципа одновременного выполнения всех рассмотренных выше условий. Исключение — малозатратные мероприятия. Поскольку увеличение располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения относится к инвестиционным проектам, единственная цель которых — поддержание функционирования системы, то условием оптимальности этих мероприятий будет минимизация затрат. В качестве критерия в данном случае необходимо рассматривать годовые дисконтированные затраты в системе за время реализации проекта:

$$З = \sum_{t=0}^{T_{пр}} К_t \frac{1}{(1+E)^t} + \sum_{t=0}^{T_{пр}} И_t^* \frac{1}{(1+E)^t}, \qquad (6)$$

где $И_t^*$ — текущие издержки на t-м шаге, необходимые для функционирования системы при увеличенной мощности, руб.; K_t — капитальные вложения на t-м шаге, необходимые для увеличения располагаемой мощности руб.; E — приемлемая норма дохода на капитал, год$^{-1}$; $T_{пр}$ — срок службы рассматриваемого объекта инвестирования, лет; t — номер шага расчета от $t = 0$ до $T_{пр}$.

Для сопоставления различных мест и способов оценки увеличения мощности системы может быть использовано изменение годовых дисконтированных затрат в системе:

$$\Delta З = \sum_{t=0}^{T_{пр}} К_t \frac{1}{(1+E)^t} + \sum_{t=0}^{T_{пр}} \left(И_t^* - И_{tc}\right) \frac{1}{(1+E)^t}, \qquad (7)$$

где $И_{tc}$ — текущие издержки на t-м шаге, необходимые для функционирования системы без увеличения мощности, руб.

При определении годовых издержек необходимо учитывать расчетные характеристики теплопотребления как конкретных потребителей, так и всей системы централизованного теплоснабжения, которые характеризуют затраты топлива [2, 3].

Зависимость теплоты от времени [4] для любого объекта можно описать следующей формулой:

$$\frac{Q_{мес}}{Q_{год}} = \left[\cos\left(\frac{\tau - \tau_{max}}{T} 2\pi\right) + 1\right]^a \frac{Q_{max}}{2bQ_{год}} + q_{ГВС}, \qquad (8)$$

где τ_{max} — момент времени, к которому достигается наибольшая нагрузка котельной Q_{max}; T — продолжительность года; $q_{ГВС}$ — доля выработанной теплоты, идущей на горячее водоснабжение; a и b — эмпирические коэффициенты.

Доля нагрузки на ГВС $q_{ГВС}$ принята постоянной в течение года и равной минимальной нагрузке, соответствующей июню. Ее исключают из общего теплового баланса, вычитая из ежемесячной нагрузки минимальную. В случае, когда неизвестны величины отпуска тепла с котельной по месяцам, но известны доли потребления, $q_{ГВС}$ исключают из общего теплового баланса следующим образом:

$$\left(\frac{Q_{мес}}{Q_{год}}\right)_{без\ ГВС}^{i} = \frac{\left(\frac{Q_{мес}}{Q_{год}}\right)^i - \left(\frac{Q_{мес}}{Q_{год}}\right)_{min}}{100 - 12\left(\frac{Q_{мес}}{Q_{год}}\right)_{min}} 100. \qquad (9)$$

Определение тепловой нагрузки за месяц:

$$Q_{мес} = \frac{Q_{мес\ max}}{\left(\frac{Q_{мес}}{Q_{год}}\right)_{max}} \left(\frac{Q_{мес}}{Q_{год}}\right), \qquad (10)$$

где $\left(\frac{Q_{мес}}{Q_{год}}\right)_{max}$ — максимальное значение относительной тепловой годовой характеристики; $\left(\frac{Q_{мес}}{Q_{год}}\right)$ — значение относительной тепловой годовой характеристики для данного периода; $Q_{мес\ max}$ — максимальная тепловая нагрузка объекта.

При наличии нагрузки ГВС требуется добавить эту величину к ежемесячной нагрузке.

Потребление за год определяется по формуле

$$Q_{\text{год}} = \frac{Q_{\text{мес max}}}{\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)_{\max}}. \qquad (11)$$

Зная стоимость 1 Гкал или 1 кВт, можно определить потребление энергии как в топливном, так и в денежном эквиваленте.

Основной принцип оценки эффективности инвестиционных проектов — это заимствованный из зарубежной практики принцип учета многообразия интересов, согласно которому, мероприятие может быть признано экономически эффективным только при условии его экономической целесообразности для всех участников и отсутствии негативного эффекта на субъектов, не участвующих в нем. Реализация данного принципа при оценке методов повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения возможна только на основе комплексного анализа, который учитывает взаимосвязь между физическими закономерностями производства и преобразования тепловой энергии и особенностями экономической эффективности инвестиций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Требунских, С.А.** Энтропийная эффективность теплопотребляющих объектов [Текст] / С.А. Требунских, А.Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. № 2(123). — 2011. № 2.— С. 91–99.

2. **Басс, М.С.** Упрощенная методика расчета нормативов удельных расходов топлива в отопительных котельных применительно к условиям Забайкальского края [Текст] / М.С. Басс, А.Г. Батухтин, С.А. Требунских // Промышленная энергетика.— 2009. № 9. — С. 37–41.

3. **Басс, М.С.** Методика оптимизации состава оборудования в комбинированных системах теплоснабжения / М.С. Басс, А.Г. Батухтин, С.Г. Батухтин // Промышленная энергетика.— 2012. № 10. — С. 49–52.

4. **Басс, М.С.** Годовые характеристики систем теплоснабжения [Текст] / М.С. Басс, С.Г. Батухтин, К.А. Кубряков // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 3-2(154).— С. 39–45.

БАСС Максим Станиславович — *кандидат технических наук, доцент директор трансфера технологий Технопарка Забайкальского государственного университета.*
672039, ул. Александро-заводская, 30 г. Чита, Забайкальский государственный университет, Россия
(3022) 41-70-85
bms77@mail.ru

БАТУХТИН Андрей Геннадьевич — *кандидат технических наук, доцент, директор Технопарка Забайкальского государственного университета.*
672039, ул. Александро-заводская, 30г. Чита, Забайкальский государственный университет, Россия
(3022) 41-70-85

ТРЕБУНСКИХ Сергей Анатольевич — *кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭС Технопарка Забайкальского государственного университета.*
672039, ул. Александро-заводская, 30, Забайкальский государственный университет, Россия
(3022) 41-70-85

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 536.245

Н.П. Соколов, В.Г. Полищук, К.Д. Андреев

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В КАНАЛАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ СО СКРЕЩИВАЮЩИМСЯ ОРЕБРЕНИЕМ

N.P. Sokolov, V.G. Polishchuk, K.D. Andreev

THE HYDRAULIC RESISTANCES IN THE RECTANGULAR CROSS-SECTION CHANNELS WITH CROSSED RIBS

Дан обзор всех опубликованных на момент выпуска настоящей статьи работ по экспериментальному исследованию гидравлических характеристик трактов с компланарными каналами (каналы со скрещивающимся оребрением). Проведен анализ и сопоставление результатов опытных исследований коэффициентов гидравлических сопротивлений в трактах с компланарными каналами.

КОМПЛАНАРНЫЕ КАНАЛЫ. ВИХРЕВЫЕ ТРАКТЫ. СКРЕЩИВАЮЩЕЕСЯ ОРЕБРЕНИЕ. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

The review of papers on the experimental investigations of the hydraulic characteristics of the coplanar channels tracts (the channels with crossed ribs) is made. The comparison analysis of the results of the experimental investigations of the hydraulic resistances coefficients in the coplanar channels tracts is carried out.

COPLANAR CHANNELS. VORTICAL CHANNELS. CROSSED RIBS. HYDRAULIC RESISTANCE. EXPERIMENTAL INVESTIGATION.

В результате интенсификации процессов теплообмена можно достичь существенного уменьшения веса и габаритных размеров теплообменного оборудования, а также обеспечить заданный температурный уровень элементов этого оборудования и повысить надежность их работы.

Наилучшие показатели интенсификации теплообмена в среде газообразных теплоносителей могут быть достигнуты при использовании оребрения. Оребрение не только увеличивает поверхность теплообмена с той стороны, где коэффициенты теплоотдачи имеют более низкое значение, но и оказывает большое влияние на гидродинамику потока.

Геометрические характеристики трактов с компланарными каналами и основные критерии подобия течения в таких трактах

Применительно к внутренним задачам усложнение конфигурации теплообменных поверхностей наиболее часто достигается за счет размещения поперечного или расположенного под некоторым углом к потоку оребрения на стенках каналов, которое в предельном случае соприкосновения ребер на противоположных стенках приводит к полизональному оребрению канала кольцевого сечения или скрещивающемуся оребрению канала прямоугольного сечения. Каналы с таким оребрением находят широкое применение, например в трактах охлаждения лопаточных аппаратов высокотемпературных газовых турбин [1]. Если же ребра на одной широкой стенке канала прямоугольного сечения с большим отношением сторон $B{:}H$ пересекаются с ребрами противоположной стенки, то получается теплообменный тракт со взаимно пересекающимся и скрещивающимся оребрением. Такой тракт характеризуется следующими геометрическими размерами (рис. 1): шириной B, высотой H и длиной L исходного базового канала, толщиной b, высотой $h_р$ и шагом установки S ребер прямоугольного сечения, величиной взаимного пересечения ре-

бер $h_п$ и углом их установки по направлению продольной оси канала β. Если ребра имеют не прямоугольное сечение, то вводится угол наклона поверхности ребра к плоскости основной широкой стенки α. При этом между указанными высотами H, $h_р$ и $h_п$ существует взаимосвязь: $2h_р = H + h_п$. Объем $V_в$, занимаемый теплоносителем в тракте с компланарными каналами, и общая теплообменная поверхность тракта F_Σ в случае прямоугольного оребрения могут быть определены по соотношениям

$$V_в = LB\,[2h_р\,(1 - b/S) + h_п\,(b/S)^2]; \qquad (1)$$

$$F_\Sigma = 2LB\,[1 + 2h_р/S + H(1 - b/S)/B - 2b(2h_п + b)/S^2]. \qquad (2)$$

Другой обобщенной геометрической характеристикой тракта с компланарными каналами может служить эквивалентная площадь проходного сечения $f_э = V_в/L$. Тогда может быть определена и усредненная по всему объему тракта скорость течения $w_э = G/(\rho f_э)$. Использование эквивалентных геометрических параметров $d_э$ и $f_э$ при обработке и обобщении опытных данных по гидравлическим характеристикам каналов рассматриваемой конфигурации представляется целесообразным ввиду их универсальности. Так, в соответствии с соотношениями (1), (2) для базового канала без оребрения получаются обычные формулы для определения эквивалентного и гидравлического диаметров

$$d_э = 4V_в/F_S;\ d_г = 4f_0/П_0. \qquad (3)$$

Вообще же использование метода анализа размерностей из теории обобщенных переменных приводит к следующим уравнениям подобия для описания закономерностей гидравлического сопротивления [2]:

$$\zeta = f(\mathrm{Re};\ L/B;\ B/H;\ S/B;\ S/b;\ h_р/S;\ \beta), \qquad (4)$$

где $\zeta = 2\Delta p/(\rho w^2)$ — коэффициент гидравлического сопротивления тракта с компланарными каналами.

Обзор условий проведения опытов основных результатов экспериментальных исследований

По-видимому, одно из первых исследований тракта со скрещивающимся оребрением, образующим компланарные каналы, было проведено в МВТУ в начале 80-х годов [3]. Опыты по исследованию гидравлических характеристик трактов проводились на разных моделях, причем модели представляли собой прямой канал кольцевого сечения с полизональным оребрением (цилиндрический корпус с внутренней винтовой нарезкой и втулкой с внешней винтовой нарезкой, направленной в противоположную сторону). Угол скрещивания компланарных каналов — это сумма углов захода винтовой нарезки на корпусе $\beta_к$ и втулке $\beta_в$.

Изменение геометрических параметров кольцевого тракта с компланарными каналами реализовалось за счет изменения параметров винтовой нарезки втулки модели.

Результаты опытного исследования коэффициентов сопротивления на участке гидродинамически стабилизированного течения были представлены в виде зависимостей $\xi = f(\mathrm{Re})$. На основании анализа результатов авторы [3] делают вывод о том, что в диапазоне критериев $\mathrm{Re} = (2–4)\cdot 10^3$ характер течения существенно не меняется, а область автомодельности начинается при $\mathrm{Re} = (1–1{,}5)\cdot 10^4$. С увеличением угла скрещивания возрастает и коэффициент трения и темп его увеличения.

Данные по коэффициентам гидравлического трения в [3] были обобщены эмпирической формулой

$$\xi = \frac{e^{1{,}47(\beta_к + \beta_в) + 5{,}24}}{\mathrm{Re}^{1{,}32}} + e^{1{,}73(\beta_к + \beta_в) - 4{,}7}. \qquad (5)$$

В середине 80-х годов в МАТИ были проведены исследования гидравлических характеристик собственно в каналах прямоугольного сечения со скрещивающимся оребрением [4, 5].

Анализ данных показал, что с ростом значений критерия Re снижаются коэффициенты гидравлического сопротивления ς, а увеличение 2β от 30 до 120° приводит к росту ς более чем в 10 раз.

Опытные данные аппроксимировались выражением

$$\xi = 1370\,\bar{\beta}^{2{,}75}\,\frac{\bar{\beta}^2 + 0{,}78\bar{\beta} + 0{,}19}{\mathrm{Re}_э^{0{,}23}}, \qquad (6)$$

где $\bar{\beta} = \dfrac{2\beta}{\pi}$.

Размещение взаимоперекрещивающихся ребер ведет к увеличению коэффициентов гидравлического сопротивления в 25–30 раз.

Вслед за первыми опубликованными работами [4, 5] появились новые результаты экспе-

риментальных исследований гидравлических характеристик, проведенных в МАТИ [6, 7]. Боковые поверхности представляли собой оребренные пластины, при этом одна боковая стенка имела форму полуокружности, а другая была плоской. Внутренняя полость моделей была системой скрещивающихся под заданным углом 2β ребер.

Анализ гидравлических характеристик показал, что увеличение относительного шага оребрения $\bar{S}$ сопровождалось ростом сопротивления. Это обстоятельство авторы исследований [6, 7] объясняли как увеличением площади взаимодействия пересекающихся струй воздуха, так и менее интенсивным затуханием возмущений в потоке охладителя. Выяснилось, что изменение угла 2β в интервале от 30 до 120° ведет к возрастанию коэффициентов ς в несколько десятков раз в связи с увеличением количества зон, в которых происходит взаимодействие потока хладагента с боковыми стенками модели, и общей протяженности каналов.

Одно из всеобъемлющих экспериментальных исследований гидравлических сопротивлений и макроструктуры потока в трактах из компланарно-скрещивающихся каналов выполнялось в первой половине 80-х годов в КНПО «Труд» применительно к охлаждаемым рабочим лопаткам турбин авиационных двигателей типа НК [8]. В рассматриваемой работе на крупномасштабном модельном канале была исследована общая картина течения при визуализации потока жидкости различными способами. Было установлено, что поток движется по отдельным межреберным каналам и перетекает из каналов одной половины системы в каналы противоположной только вблизи боковых стенок тракта. Визуализацией линий тока вблизи стенок канала было показано, что в тракте можно выделить несколько участков с различными типами течения. На начальном участке в каналах, начинающихся от входного сечения тракта и заканчивающихся у первого поворота на боковой поверхности тракта, вектор скорости совпадает с осью канала. Основной участок, состоящий из каналов, начинающихся у боковых стенок тракта, характеризуется закруткой потока относительно оси отдельного канала, что обусловлено его пространственным поворотом у боковой стенки.

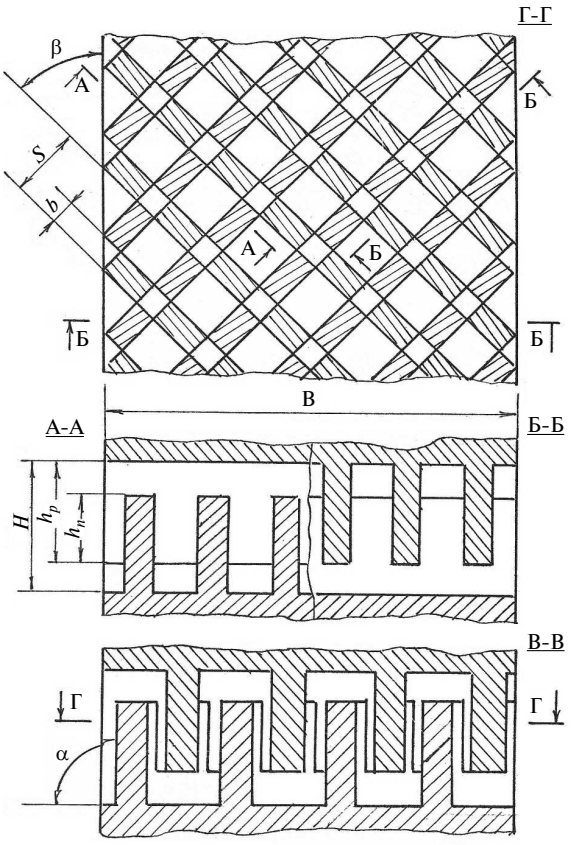


Рис. 1. Конфигурация и основные геометрические размеры тракта со взаимно-пересекающимся и скрещивающимся оребрением (компланарными каналами)

Исследование полей скоростей и давлений в сечениях модельного канала подтвердило результаты визуализации и дополнило их количественными характеристиками.

В исследованиях [8] было установлено, что закономерности гидравлического трения и структура потока различны на начальном и основном участках тракта с компланарными каналами.

На начальном участке трение не зависит от угла 2β и при Re = idem определяется только относительной протяженностью каналов, принципиально не отличается от трения в прямых гладких каналах той же относительной протяженности и может вычисляться по формулам для потока в коротких каналах [1].

На основном участке тракта коэффициент трения ξ существенно выше, чем в прямых каналах с гидравлически гладкими стенками. Так, в тракте с компланарными каналами, скрещи-

вающимися под углом $2\beta = 90°$, при $\mathrm{Re}_x = 6\cdot10^5$ коэффициент трения возрастает в 3,1 раза. При этом основное влияние на коэффициент трения ξ оказывали параметры $\mathrm{Re}_г$, β и x. Относительные коэффициенты трения ξ/ξ_0 возрастали с уменьшением $\mathrm{Re}_г$ и x и имели максимум при $2\beta = 90°$.

Результаты измерений осредненного коэффициента трения по длине x канала основного участка тракта с компланарными каналами в рассматриваемой работе [8] для всего исследуемого диапазона изменения геометрических характеристик удалось обобщить критериальным соотношением

$$\xi = 0,43\left[1 + 28\left(\sin 2\beta\right)^3\right]\mathrm{Re}_x^{n-1};$$

$$n = 0,8 + 0,16\left[\left(1,27\beta - 1\right)^2 - 1\right]. \qquad (7)$$

Коэффициенты гидравлического сопротивления при повороте потока у боковых стенок тракта с компланарными каналами не зависели от величины критериев Re и были обобщены эмпирической формулой

$$\zeta_{пов} = 5\frac{\left(h_p\dfrac{\sin\beta}{S-b}\right)^2}{\sqrt{\dfrac{2B\cos\beta}{S}}}. \qquad (8)$$

Полученные эмпирические соотношения для коэффициентов трения (7) и гидравлического сопротивления (8) для отдельных участков тракта с компланарными каналами позволяли определить и его общий коэффициент гидравлического сопротивления по формуле

$$\zeta_\Sigma = \zeta_{вх} + \zeta_{вых} + n\zeta_{пов} +$$

$$+ \bar{L}_н\left[\left(\xi_{тр1} + \xi_{тр2}\right)/2 + \left(n-1\right)\xi_{тр2}\right], \qquad (9)$$

где $n = L/\left(l\cos\beta\right) = L\sin\beta/\left(B\cos\beta\right)$ — количество разворотов отдельного канала тракта у его боковых стенок; $\bar{L}_н = L_н/d_г$ — некоторая средняя относительная длина каналов на начальном участке тракта. Для начального участка тракта было принято, что на первой половине длины каналов реализуется обычное турбулентное течение с коэффициентом трения $\xi_{тр1}$, а на второй половине их длины — с коэффициентом трения $\xi_{тр2}$, определяемым по формуле (7)

В опытах, поставленных в ЛНПО им. В.Я. Климова, исследовано гидравлическое сопротивление в тракте с компланарными каналами, расположенными под углами β равными 30° и 45° [9]. Полученные данные показали, что пропускная способность зависит от угла скрещивания и переход от угла $2\beta = 90°$ к углу $2\beta = 60°$ ведет к увеличению пропускной способности ровно в 2 раза. Полученный при этом линейный характер зависимостей $G = f\left(\Delta p/p\right)$ указывал, по мнению автора [9], на автомодельность коэффициентов гидравлического сопротивления ζ по критериям Рейнольдса в исследованном диапазоне их изменения $\mathrm{Re} = (27,5–90,5)\cdot10^3$.

Опыты, в которых исследовались тракты с компланарными каналами, образованными не только взаимно пересекающимся, но и скрещивающимся оребрением, были поставлены в ЛГТУ [10]. Опытные данные представлялись в форме зависимостей коэффициентов гидравлического сопротивления ζ от критериев Re с выделением в качестве параметров глубины взаимного пересечения ребер $h_п$ и угла их скрещивания 2β.

Переход от матриц без пересечения оребрения ($h_п = 0$) к матричной системе с ребрами, взаимно врезанными на глубину $h_п = 2,0$ мм, т. е. увеличение высоты ребер с 6 до 7 мм (примерно на 15 %), ведет к росту гидравлического сопротивления в системах с углом скрещивания $2\beta = 90°$ в 2 раза.

Изменение угла скрещивания ребер 2β для случая $h_п = 4,0$ мм в 2 раза ведет к изменению ζ не менее чем в 5 раз. Примерно такое же влияние угла скрещивания 2β на коэффициенты гидравлического сопротивления и при других значениях величины взаимного пересечения ребер $h_п$.

Характер расположения опытных точек говорит об области автомодельности коэффициентов ζ по критерию Re. Опытные данные позволили авторам [10] определить границы области автомодельности. Для определения величины ζ в рассматриваемой области автомодельности была предложена эмпирическая формула, имеющая точность ± 15 %:

$$\zeta = \frac{162\beta^2 - 90\beta + 21,5}{0,8 - h_n} +$$

$$+ 1,15\overline{\beta}^2 - 985\overline{\beta} + 193. \qquad (10)$$

При значениях критериев за границей области автомодельности коэффициенты гидравлического сопротивления ζ с увеличением кри-

териев Re убывают. Аппроксимация опытных результатов в этой области критериев Re степенной зависимостью позволила получить приближенную формулу с погрешностью не выше ± 30 %:

$$\zeta = A/\mathrm{Re}^m, \quad m = 0{,}15 + 0{,}525\bar{h}_n. \qquad (11)$$

Использованный в опытах МГТУ [11] модельный канал со скрещивающимся оребрением был образован двумя оребренными пластинами, образующими при наложении их друг на друга заданную конфигурацию. Методика обработки и обобщения опытных данных та же, что и в ранее выполненной работе [3].

Исследованное в ЦИАМ [12] оребрение имело не прямоугольную форму, как во всех выше рассмотренных работах, а близкую к трапецеидальной со скругленными радиусами r'' и r' вершинами трапеций и промежутками между ними. Примененное оребрение поверхности характеризовалось относительно небольшими размерами и двумя значениями углов скрещивания ребер 2β — 50° и 130°.

Результаты экспериментальных исследований гидравлических характеристик с отклонением, не превышающим ± 23 %, аппроксимировались критериальным соотношением

$$\xi = 4{,}85\bar{\beta}^{3{,}71}\left(d_г/l\right)^{2{,}39}/\mathrm{Re}^{0{,}426}\,\bar{\alpha}^{8{,}91}\left(h/S\right)^{3{,}2}. \qquad (12)$$

Диапазон же изменения относительной длины $l/d_г$ остался неопределенным, что, конечно, затрудняет пользование найденными соотношениями.

В работе сотрудников из Chemical Engineering Research Group, Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) (ЮАР) рассмотрено влияние угла скрещивания двух противоположных синусоидально гофрированных стенок на теплогидравлические характеристики образуемых ими каналов пластинчатых теплообменных аппаратов [13].

Угол скрещивания компланарных каналов варьировался от $\beta = 0°$ до $\beta = 90°$.

Коэффициенты гидравлического сопротивления, отнесенные на единицу характерного размера $2H$, вычислялись по формуле

$$\xi' = \frac{2\Delta p}{\rho w'^2}\frac{2H}{L}. \qquad (13)$$

Опытные данные по сопротивлению представлялись в форме корреляций коэффициентов трения ξ' с критериями Re с отклонением 7 %:

$$\xi' = \frac{B}{\mathrm{Re}^n}. \qquad (14)$$

По представленным опытным корреляциям между коэффициентами трения и критериями Рейнольдса с использованием в качестве параметра угла скрещивания β видно, что с увеличением значений критериев Re коэффициенты ξ' монотонно понижаются при любом значении угла β. В то же время зависимость коэффициентов ξ' от углов β в диапазоне их изменения в опытах оказывается немонотонной, и существует значение угла $\beta = 80°$, при котором ξ' максимальны.

Для каждого из исследованных в опытах углов β данные по коэффициентам сопротивления были аппроксимированы на отдельных участках полного диапазона изменения критериев Рейнольдса критериальными соотношениями вида (14) с подходящими степенями m. Так, для угла скрещивания $\beta = 45°$ было получено следующее:

при Re = 150–1800

$$\xi' = 1{,}21 + 3{,}67/\mathrm{Re};$$

при $\mathrm{Re} = (1{,}8–30)\cdot 10^3$

$$\xi' = 5{,}84/\mathrm{Re}^{0{,}177}. \qquad (15)$$

Соотношение между различными параметрами подобия процессов течения в трактах с компланарными каналами

Из представленного материала видно, что на сегодняшний день имеется небольшое количество опубликованных работ по экспериментальному исследованию гидравлики трактов охлаждения с компланарными каналами.

Все модельные каналы, за исключением канала кольцевого сечения, выполнялись плоскими и имели поперечное сечение либо в форме прямоугольника с прямыми [9, 10] или скругленными [4, 5, 8] углами либо в форме вытянутого равнобедренного треугольника со скругленным острым углом у вершины [7]. Относительная высота каналов $H/h_р$ с непересекающимся оребрением принимала тривиальное значение 2 и только в единственном исследовании ЛГТУ [10], где исследовалось взаимно пересекающееся оребрение, снижалась до 1,35.

Неоднородность используемых параметров требует определенных дополнительных преобразований имеющихся критериальных соотно-

шений для сопоставления. При этом гидравлический диаметр определяется через площадь проходного сечения $f_к$ и смоченный периметр $П_к = S - b + 2h_р$ отдельного межреберного канала $d_г = 4f_к/П_к$, а эквивалентный диаметр отыскивается с использованием выражений (1), (2).

Тогда для случая $h_п = 0$ эквивалентный диаметр описывается формулой

$$d_э = \frac{4V_в}{F_\Sigma} = \frac{2H(1-b/S)}{1+H/S+(H/B)(1-b/S)-2(b/S)^2}, \quad (16)$$

а гидравлический диаметр отдельного межреберного канала — формулой

$$d_г = \frac{4f_{к\Sigma}}{П_\Sigma} = \frac{2H}{1+H/S}\left(1-\frac{b}{S}\right). \quad (17)$$

Итак, для трактов с компланарными каналами при непересекающемся оребрении ($h_п = 0$) эквивалентный диаметр определяется выражением (16), а гидравлический — (17). Отсюда их соотношение есть

$$\frac{d_э}{d_г} = \frac{1+H/S}{1+H/S+(H/B)(1-b/S)-2(b/S)^2}. \quad (18)$$

Далее найдем соотношение между проходными площадями сечений $f_{к\Sigma}$ и некоторой эквивалентной $f_э$, определяемой по формуле $f_э = V_в/L$. Формула определения проходной площади $f_{к\Sigma}$ в случае $h_п = 0$ имеет вид

$$f_{к\Sigma} = 2(S-b)h_p B\cos\beta/S = HB(1-b/S)\cos\beta,$$

а для определения эквивалентной площади сечения

$$f_э = BH(1-b/S).$$

Откуда для их отношения получается совсем простое выражение

$$f_э/f_{к\Sigma} = 1/\cos\beta.$$

Полученные связи между диаметрами $d_г$ и $d_э$ и площадями $f_{к\Sigma}$ и $f_э$ позволяют выполнять пересчеты критериев Re и коэффициентов трения ξ:

$$\mathrm{Re}_г = \frac{Gd_г}{\mu f_{к\Sigma}} = \frac{1+H/S+(H/B)(1-b/S)-2(b/S)^2}{(1+H/S)\cos\beta}\mathrm{Re}_э; \quad (19)$$

$$\xi_г = \frac{d_г}{L}\frac{2\Delta P}{\rho w^2} = \xi_э\cos^2\beta\frac{d_г}{d_э}.$$

Анализ и сопоставление результатов экспериментальных исследований

Целесообразно проводить сравнение полученных критериальных соотношений в координатах $\xi = f(\mathrm{Re})$ с использованием относительного угла скрещивания ребер $\overline{\beta} = 2\beta/\pi$. Этот параметр используется во всех критериальных соотношениях и оказывает наиболее существенное влияние на величину коэффициентов сопротивления. Далее сравнение ведется для непересекающегося оребрения ($h_п = 0$) с углом скрещивания $2\beta = 90°$ ($\overline{\beta} = 0{,}5$), поскольку такой угол устанавливался во всех опытах и был близок к среднему из диапазона $\overline{\beta} = 0$–$1{,}0$ их изменения в различных опытах. В качестве определяющего размера во всех сравниваемых соотношениях $\xi_э = f(\mathrm{Re}_э)$ принят эквивалентный гидравлический диаметр $d_э$, определяемый по (1), (2), так что по определению

$$\xi_э = \frac{2\Delta p}{\rho w_э^2}\frac{d_э}{L}; \qquad \mathrm{Re}_э = \frac{Gd_э}{\mu f_э} = \frac{\rho w_э d_э}{\mu}. \quad (20)$$

Использование в сравнении коэффициентов сопротивления ξ, отнесенных на единицу безразмерной длины канала, потребовало прежде всего досчета опытных данных ЛГТУ [10], поскольку результаты этих опытов были обработаны в форме зависимости полного коэффициента сопротивления канала $\zeta_э$ от величины критерия $\mathrm{Re}_э$. В итоге для расчетов коэффициента сопротивления $\zeta_э$ канала с $2\beta = 90°$ и $h_п = 0$ по опытным данным ЛГТУ для области автомодельности по критерию $\mathrm{Re}_э$ использовалась формула (10):

$$\xi_э = \frac{d_э}{L}\left[1150\overline{\beta}^2 - 985\overline{\beta} + 193 + \left(162\overline{\beta}^2 - 90\overline{\beta} + 21{,}5\right)/0{,}8\right] = 0{,}425. \quad (21)$$

Граничное значение критерия $\mathrm{Re}_{э\,гр}$ для этой области автомодельности в соответствии с выражением (9) составило $\mathrm{Re}_{эгр}^{max} = 20{,}5\cdot10^3$. Коэффициент сопротивления $\xi_э$ подсчитывался уже с использованием формулы (11) для $m = 0{,}15$ и $A = 43$:

$$\xi_э = \frac{d_э}{L}\frac{A}{\mathrm{Re}^m} = \frac{1{,}8735}{\mathrm{Re}^{0{,}15}}. \quad (22)$$

Построенная по соотношениям (21) и (22) зависимость $\xi_э = f(\mathrm{Re}_э)$, обобщающая данные

ЛГТУ [10], нанесена на график рис. 2 (линия *1*). Для проведения обоснованного сопоставления всех результатов все они приводились к относительным геометрическим размерам тракта с компланарными каналами, исследованного в ЛГТУ [10].

Линия $\xi_э = f(\mathrm{Re}_э)$, обобщающая данные МВТУ [3], была построена с использованием формулы (5), где $b_к = b_в$, $b_к + b_в = 2\beta$, и для $2\beta = \pi/2$

$$\xi_г = \frac{1900}{\mathrm{Re}_г^{1,32}} + 0{,}137. \qquad (23)$$

Отсюда с использованием соотношений (16) между $\mathrm{Re}_г$ и $\mathrm{Re}_э$ и (17) между $\xi_г$ и $\xi_э$ получалась окончательная зависимость в виде

$$\xi_э = \frac{2593}{\mathrm{Re}_э^{1,32}} + 0{,}283. \qquad (24)$$

Полученная расчетом по формуле (24) линия *2* нанесена на графике рис. 2, откуда видно, что опыты, выполненные в МВТУ [3], приводят к меньшим примерно на 25 % значениям коэффициентов сопротивления ξ, чем опыты ЛГТУ, в диапазоне их перекрытия по критериям $\mathrm{Re}_э = (4–20)\cdot 10^3$. И это вполне объяснимо, поскольку в модельном канале МВТУ, имеющем кольцевое поперечное сечение и полизональное оребрение, отсутствуют развороты потока у боковых стенок тракта.

Результаты МАТИ [6], рассчитанные по уравнению (6) для $2\beta = 90°$:

$$\xi_э = \frac{10{,}18}{\mathrm{Re}^{0,23}}. \qquad (25)$$

Результаты расчетов по этой формуле, представлены на графике рис. 2 линией *3*.

Переходя к анализу обобщающих критериальных соотношений по коэффициентам гидравлического сопротивления, полученным в КНПО [8], следует отметить, что в этой работе коэффициент гидравлического сопротивления для канала складывается из коэффициентов гидравлического сопротивления на его отдельных участках:

$$\zeta = \zeta_н + \zeta_0 + \zeta_к. \qquad (26)$$

Коэффициенты гидравлического сопротивления на каждом из участков складываются соответственно из коэффициентов гидравлических потерь на входе в участок $(\zeta_{вх})$, потерь на трение потока $(\zeta_{тр})$, потерь при повороте потока у боковой стенки тракта $(\zeta_{пов})$ и потерь на выходе из участка $(\zeta_{вых})$, так что для каждого участка

$$\xi_{тр1} = 0{,}3165/\mathrm{Re}_г^{0,25};$$

$$\xi_{тр2} = 4{,}46/\mathrm{Re}_г^{0,363}. \qquad (27)$$

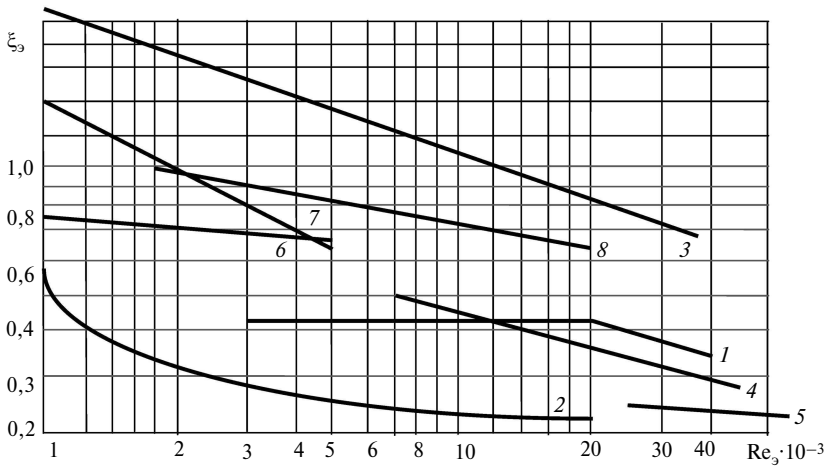


Рис. 2. Сопоставление эмпирических критериальных соотношений для расчетов коэффициентов сопротивления в каналах со скрещивающимся под углом $2\beta = 90°$ оребрением, полученных различными организациями:

1 — ЛГТУ [10]; *2* — МВТУ [3]; *3* — МАТИ [6]; *4* — КНПО [8]; *5* — ЛНПО [9]; *6*, *7* — ЦИАМ [12, 14]; *8* — CSIR [13]

В итоге в пределах начального участка

$$\zeta_{тр} = 0,5\left(\xi_{тр1} + \xi_{тр2}\right)\frac{l_н}{d_г} =$$

$$= 8,5\left(\frac{0,3165}{\mathrm{Re}_г^{0,25}} + \frac{4,46}{\mathrm{Re}_г^{0,363}}\right). \qquad (28)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления разворота потока у боковой стенки тракта с компланарными каналами определяется по формуле (8), которая для рассматриваемого случая трансформируется в постоянное значение

$$\zeta_{пов} = 1,25\frac{\left(H\sin 2\beta/\left(S-b\right)\right)^2}{\sqrt{m}} =$$

$$= 1,25\left(12/10\right)^2/\sqrt{9} = 0,6. \qquad (29)$$

Общие потери давления на этом участке

$$\zeta_н = 0,816 + 8,5\left(\frac{0,3165}{\mathrm{Re}_г^{0,25}} + \frac{4,46}{\mathrm{Re}_г^{0,363}}\right). \quad (4.11)$$

При подсчете коэффициента гидравлического сопротивления основного участка тракта по формуле (9) в расчет принимаются только коэффициенты $\zeta_{тр}$, определяемые по формуле

$$\zeta_{тр} = \xi_{тр2}\frac{L}{d_г} = 17\xi_{тр2}, \qquad (31)$$

где $\xi_{тр2}$ считается по соотношению (27), а $L/d_г = 17$ — относительная длина каналов на основном участке тракта; $z_{пов} = 0,569$ в соответствии с формулой (29) при $m = 10$.

Аналогичным образом определен и общий коэффициент гидравлического сопротивления конечного участка.

Суммарные коэффициенты сопротивления тракта определены по (26). Пересчет этих коэффициентов на коэффициенты сопротивления на единицу длины канала выполнялся по (25), а величины критериев $\mathrm{Re}_э$ — по соотношению (24).

Полученная в результате изложенного пересчета зависимость $\xi_э = f(\mathrm{Re}_э)$, обобщающая результаты опытов КНПО [8], представлена на графике рис. 2 линией *4*. Она удовлетворительно корреспондируется с линией *1*.

Переходя к анализу опытных данных ЛНПО [9], следует обратить внимание, что они были представлены графическими зависимостями коэффициентов гидравлического сопротивления от критериев Рейнольдса. К обработке были приняты опытные данные для $2\beta = 90°$:

$$\zeta_э = \frac{2\Delta p}{\rho w_э^2} = 2,17\cdot 10^{-12}\frac{\Delta pp}{G^2};$$

$$\xi_э = \zeta_э\frac{d_э}{L} = \zeta_э\frac{4,9}{164}. \qquad (32)$$

По результатам расчетов по этим формулам на рис. 2 нанесена осредняющая их линия *5*, которая располагается заметно (на 25–35 %) ниже линий *1* и *4*, обобщающих опытные данные соответственно ЛГТУ и КНПО, и лишь ненамного ниже продолжения линии *2* (МАТИ).

Линия *6* отражает исследования в ЦИАМ [12]. Для обсчета исследуемого случая $2\beta = 90°$ по формуле (12) было принято: $\alpha = \pi/3$ ($\bar{\alpha} = \alpha/\pi = 1/3$), $h/S = (h/b)/(S/b) = 0,474 \approx 0,5$. Подстановка в формулу (12) приводила к следующей зависимости ξ от величины критерия $\mathrm{Re}_г$:

$$\xi_г = \frac{10,45}{\mathrm{Re}_г^{0,426}}. \qquad (33)$$

Теперь оставалось только преобразовать параметры $\xi_г$ и $\mathrm{Re}_г$ в $\xi_э$ и $\mathrm{Re}_э$, что выполнялось по формулам (24) и (25)

Таким образом, результаты рассмотренных опытов [12] по определению гидравлических сопротивлений в трактах с волнистым оребрением приводят к большей величине этих коэффициентов, чем результаты опытов на трактах с прямоугольным оребрением (см. рис. 2).

В целом же, если принимать в расчет только данные по оребрению прямоугольного профиля, можно констатировать, что эмпирические критериальные соотношения КНПО [8] и ЛГТУ [10] приводят к весьма близким значениям коэффициентов гидравлического сопротивления $\xi_э$; соотношения, полученные в МВТУ [3], и обобщение опытов ЛНПО [9] как бы дополняют друг друга, приводя к практически одинаковым значениям ξ при $\mathrm{Re} = 20\ 10^3$, но отличаются от зависимостей ЛГТУ (линия *1*) и КНПО (линия *4*) примерно на 30 % в меньшую сторону. И, наоборот, зависимость МАТИ (линия *3*) приводит к значениям $\xi_э$ примерно в 2,5 раза большим, чем в ЛГТУ и КНПО.

В итоге для расчетов коэффициентов гидравлического сопротивления в трактах с компланарными каналами, образованными прямоугольным оребрением, скрещивающимся под

углом $2\beta = 90^\circ$, можно использовать эмпирические критериальные соотношения ЛГТУ [10] или КНПО [8]. Величины коэффициентов гидравлического сопротивления, рассчитанные по этим соотношениям, практически совпадают между собой и лежат в середине полосы разброса коэффициентов гидравлического сопротивления по представленным к сравнению данным различных исследований.

Очевидные существенные различия, выявленные в ходе проведенного анализа, побудили авторов настоящей работы искать универсальную зависимость, способную обобщить столь разные результаты. Для этого опытные данные, представленные на графике рис. 2, были аппроксимированы степенными зависимостями вида $\xi = B/\mathrm{Re}^n$. Далее были найдены простые линейные аппроксимации для коэффициента B и показателя степени n по относительному геометрическому параметру H/S годные для частного случая $2\beta = 90^\circ$ оребрения, а именно:

$$B = 3{,}65\frac{H}{S} - 1{,}35; \qquad n = \frac{H/S}{6}. \qquad (34)$$

Для получения универсального критериального соотношения по коэффициентам гидравлических потерь формулы (34) были доработаны. В этом случае в качестве базовых были использованы зависимости, полученные в CSIR [13]. В рассматриваемой работе для $H/S = 1$ были получены эмпирические критериальные соотношения вида $\xi = B/\mathrm{Re}^n$ для относительных углов скрещивания $\bar{\beta}$, изменяющихся в диапазоне $\bar{\beta} = (1/6)–1{,}0$, с показателями степеней n и коэффициентами B, изменяющимися с изменением относительного угла $\bar{\beta}$. Используя принцип суперпозиции влияния параметров H/S и $\bar{\beta}$ на величину коэффициентов гидравлического сопротивления ξ, а также допустив, что сохраняются как влияние параметра H/S на коэффициенты ξ при относительном угле скрещивания $\bar{\beta}$, отличном от 1/2, так и интенсивность влияния параметра $\bar{\beta}$ на коэффициенты гидравлического сопротивления при любой относительной высоте H/S, можно получить зависимости вида

$$\xi = B/\mathrm{Re}^n;$$

$$B = 3{,}65\,H/S + 150\bar{\beta}^2 - 120\bar{\beta} + 21{,}15; \qquad (35)$$

$$n = H/S/6 + 1{,}80\bar{\beta}^2 - 2{,}\cdot\beta + 55.$$

Проверка адекватности полученного соотношения имеющимся экспериментальным данным показала, что оно имеет силу в следующих диапазонах изменения параметров: $\mathrm{Re} = (4–40)\cdot 10^3$, $H/S = 0{,}6–1{,}5$ и $\bar{\beta} = (1/6)–1{,}0$.

Основные результаты нашего исследования:

определены основные геометрические характеристики и установлены связи между ними в трактах с компланарными каналами;

на базе теории обобщенных переменных при использовании метода анализа размерностей получены безразмерные комплексы, которые могут быть использованы для обработки и обобщения опытных данных по гидравлическим характеристикам таких трактов;

сделан детальный обзор всех опубликованных на момент написания настоящей статьи работ по экспериментальному исследованию гидравлических характеристик трактов с компланарными каналами; на базе этого обзора проведен анализ и сопоставление результатов опытных исследований коэффициентов гидравлических в трактах с компланарными каналами, позволившие установить наиболее надежные эмпирические соотношения и обобщить опытные данные различных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Копелев, С.З.** Конструкция и расчет систем охлаждения ГТД [Текст] / С.З. Копелев, А.Ф. Слитенко / Под ред. А.Ф. Слитенко.— Харьков: Основа, 1994.— 240 с.

2. **Исаченко, В.П.** Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сухомел.— М.: Энергия, 1975.— 488 с.

3. **Кудрявцев, В.М.** Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления в трактах с компланарными каналами [Текст] / В.М. Кудрявцев, С.А. Орлин, С.А. Поснов // Известия вузов. Машиностроение.— 1983. № 4.— С. 54–58.

4. **Галкин, М.Н.** Расчет и анализ внутренней теплоотдачи в охлаждаемых конструкциях с перекрестным течением охладителя [Текст] / М.Н. Галкин, А.Н. Бойко, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев // Тез. докл. Всесоюзной конф.: Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов.— Харьков: ХАИ, 1983.— С. 105–106.

5. **Галкин, М.Н.** Внутренняя теплоотдача в оребренных каналах со скрещивающимися струями охлаждающего воздуха [Текст] / М.Н. Галкин, А.Н. Бойко, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев // Изв. вузов. Машиностроение.— 1984. № 5.— С. 56–60.

6. **Галкин, М.Н.** Исследование и расчет гидравлических и тепловых характеристик охлаждаемых конструкций с компланарными каналами [Текст] / М.Н. Галкин, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев // Изв. вузов. Машиностроение.— 1985. № 3.— С. 73–76.

7. **Галкин, М.Н.** Интенсификация теплообмена в оребренных трактах с предельно большими углами скрещивающихся каналов [Текст] / М.Н. Галкин, В.П. Литвинков, В.А. Мальков [и др.] // Изв. вузов. Машиностроение.— 1987. № 9.— С. 60–63.

8. **Нагога, Г.П.** Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трактах из компланарно-скрещи-вающихся каналов [Текст] / Г.П. Нагога, И.С. Копылов, М.В. Рукин // Межвуз. научн. сб.: Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинах газотурбинных двигателей.— Казань: КАИ, 1989.— С. 35–41.

9. **Лебедев, А.С.** Экспериментальное исследование теплообмена в модельных каналах охлаждения турбинных лопаток [Текст] / А.С. Лебедев // Изв. вузов. Энергетика.— 1986. № 9.— С. 92–95.

10. **Андреев, К.Д.** Исследование теплообмена и гидравлических сопротивлений в канале прямоугольного сечения со взаимно пересекающимся и скрещивающимся оребрением [Текст] / К.Д. Андреев, Л.В. Арсеньев, В.Г. Полищук, Н.П. Соколов // Промышленная теплотехника.— 1998. Т. 20, № 3.— С. 70–75.

11. **Муравьев, В.В.** Пути повышения эффективности теплообмена в трактах с компланарными каналами [Текст] / В.В. Муравьев, Ф.В. Пелёвин // Труды II Росс. нац. конф. по теплообмену. Тез. докл. Т. 8. Студенческая секция. — М.: МЭИ, 1998. — С. 34–35.

12. **Антонов, А.Н.** Экспериментальное исследование теплопередающих поверхностей с компланарными каналами (типа Френкеля) / А.Н. Антонов, Ю.Ф. Баранов, А.Ю. Клочков [и др.] // Вестник МЭИ.— 1997. № 1.— С. 21–23.

13. **Focke, W.W.** The effect of the corrugation inclination on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers [Текст] / W.W. Focke, J. Zachariades, I. Olivier // Int. J. Heat and Mass Transfer.— 1985. Vol. 28, No. 8.— P. 1469–1479.

14. **Савостин, А.Ф.** Исследование характеристик пластинчатых поверхностей нагрева [Текст] / А.Ф. Савостин, А.М. Тихонов // Теплоэнергетика.— 1970. № 9.— С. 75–78.

СОКОЛОВ Николай Павлович – *кандидат технических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-65-66
odigitriya@mail.ru

ПОЛИЩУК Владимир Григорьевич – *кандидат технических наук, заведующий лабораторией Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-65-66
visantiya@freemail.ru

АНДРЕЕВ Константин Дмитриевич – *кандидат технических наук, доцент кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
akostik@land.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.31.015.038

А.Г. Золотых, Ф.Х. Халилов

ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТНЫМ АППАРАТАМ НЕЙТРАЛИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6–35 КВ

A.G. Zolotykh, F.H. Halilov

REQUIREMENTS FOR PROTECTIVE DEVICES NEUTRAL POWER TRANSFORMERS 6–35 KV

Проанализирована аварийность трансформаторов, связанная с нейтралью и дугогасящими реакторами. Показано, что причиной аварийности являются импульсные перенапряжения и неправильный выбор характеристик защитных аппаратов. Приведены результаты исследования перенапряжений. Изложены технические требования к защитным аппаратам на 6, 10 и 35 кВ.

НЕЙТРАЛЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ. ИЗОЛЯЦИЯ. КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ. ЗАЩИТНЫЕ АППАРАТЫ. ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.

Analyzed faults of transformers, associated with neutral and ground-fault neutralizers. It is shown that the cause of the accident is a pulse overvoltage characteristics and the wrong choice of protective devices. The results of the surges exploration are given. The technical requirements for protective devices at 6, 10 and 35 kV are given.

NEUTRAL TRANSFORMERS. OVERVOLTAGE. INSULATION. COORDINATION OF INSULATION. PROTECTIVE DEVICES. SURGE ARRESTERS.

Электрические сети 6–35 кВ в России работают в режиме изолирования нейтрали или в режимах заземления нейтрали через дугогасящий реактор при токах замыкания на землю больше нормированных [1]. В обоих режимах имеются многочисленные случаи повреждения нейтрали трансформаторов 6–35 кВ, которые происходят чаще всего по двум причинам [2]:

из-за разрушения вентильных разрядников (РВ), которые защищают нейтраль и дугогасящий реактор (ДГР) от возможных молниевых и внутренних перенапряжений [3];

при повреждении изоляции нейтрали.

Результаты анализа актов аварийности энергосистем и электрических сетей промышленных предприятий позволяют сделать вывод, что РВ разрушаются преимущественно при воздействии на них длительных перенапряжений.

Цель данной статьи — установить параметры молниевых и внутренних перенапряжений в нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ для определения требований к защитным аппаратам нейтрали.

В табл. 1 приведены испытательные напряжения изоляции силовых трансформаторов 6–35 кВ по ГОСТ 1516.3–96, а в табл. 2 — амплитуды и кратности, допустимые для изоляции нейтрали напряжений.

В последней таблице: $U_{вн}$ — допустимое на нейтрали напряжение при внутренних перенапряжениях; $U_{гн}$ — то же при молниевых перенапряжениях; $K_{вн}$, $K_{гн}$ — соответствующие допустимые кратности перенапряжений.

Рассмотрим теперь величины возможных в эксплуатации молниевых и внутренних перенапряжений.

Наиболее предпочтительный способ физического исследования молниевых перенапряжений в нейтрали — импульсный обмер «живых» трансформаторов при пониженных напряжениях. При таких обмерах была использована методика и комплекс аппаратуры, получивший название анализатора переходных процессов (АПП) в протяженных цепях [4–6].

Используя исследования на реальных объектах и в реальном масштабе времени, методика

Таблица 1

Испытательные напряжения силовых трансформаторов 6–35 кВ и их нейтрали (ГОСТ 1516.3–96)

$U_{ВП}$, кВ	Испытательное напряжение (одноминутное) изоляции, $кВ_{действ}$			Выдерживаемое напряжение (при плавном подъеме) для внешней изоляции, $кВ_{действ}$				Нормированное испытательное напряжение молниевых импульсов, кВ	
	трансформатора	нейтрали трансформатора	ввода нейтрали, испытываемого отдельно	трансформатора		нейтрали трансформатора		трансформатора	нейтрали трансформатора
				в сухом состоянии	под дождем	в сухом состоянии	под дождем		
6	25	25	32	34	26	34	26	60	60
10	35	35	42	45	34	45	34	80	80
35	85	85	95	150	85	105	85	200	200

Таблица 2

Амплитуды и кратности напряжений, допустимые для изоляции нейтрали

Изоляция нейтрали	$U_{ном}$, кВ	$U_{исп}$, кВ	$U_{вн}$, кВ	$K_{вн}$	$U_{гн}$, кВ	$K_{гн}$
полная	35	85	146	4,45	238	7,2
полная	10	35	45	4,6	77	7,8
полная	6	25	34	5,8	59	10,0

позволяет устранить погрешности, характерные для исследований с помощью физического и математического моделирования. Напряжения и токи с помощью соответствующих масштабов приводятся к низковольтным диапазонам (до 1000 В). С учетом этого обстоятельства элементы сети с нелинейными вольтамперными характеристиками (например, РВ) при таком способе исследований нуждаются в замене их моделями.

В полевых измерениях на одну, две и три фазы обмотки высокого напряжения (ВН) силового трансформатора 6–35 кВ через сопротивление, равное волновому, подается апериодическая волна в соответствии с рис. 1. Свободные фазы этой обмотки и вторичные обмотки трансформатора замыкаются на землю через волновые сопротивления.

При помощи осциллографа регистрируется напряжение на входе трансформатора ($U_о$) и напряжение в нейтрали ($U_н$). Изучалось влияние формы и амплитуды молниевой волны на величину перенапряжений в нейтрали силовых трансформаторов. Наиболее полно молниевые перенапряжения были исследованы для силовых трансформаторов 6 и 10 кВ (например, в сети 10 кВ обмер был произведен на 24 трансформаторах). Это позволило получить обобщенные зависимости величины молниевых перенапряжений от амплитуды и формы приходящей молниевой волны. Анализ экспериментальных данных выявил следующие закономерности:

1. С увеличением длины волны $T_в$ на линейных вводах трансформатора увеличивается амплитуда перенапряжений в нейтрали.

2. Величина перенапряжений в нейтрали прямо пропорциональна числу фаз, по которым одновременно приходит волна на линейные вводы трансформатора.

3. Величина перенапряжений в нейтрали силового трансформатора зависит от периода колебаний обмоток трансформатора.

Вид кривых $U_н/U_о = f(T_в)$ для всех исследованных трансформаторов однотипен, следовательно, величина $U_н/U_о$ — функция двух вели-

чин — $T_в$ и T. Графические и численные отображения функций $U_н/U_о = f(T_в/T)$ для всех исследованных трансформаторов совпали и дали единую зависимость, представленную на рис. 2.

Таким образом, можно привести формулу для определения максимальных значений перенапряжений в нейтрали силовых трансформаторов классов 6–35 кВ:

$$U_{макс} = n/3\,U_0 f(T_в/T), \qquad (1)$$

где n — число фаз, по которым одновременно приходит волна; $U_о$ — амплитуда волны перенапряжений на линейных вводах трансформатора; $f(T_в/T)$ — функция, график которой приведен на рис. 2.

Сказанное позволяет сделать следующие выводы:

1. Молниевые перенапряжения представляют опасность для изоляции нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ, поэтому применение защитных аппаратов необходимо.

2. Защитные аппараты, установленные на подстанции, снижают величину напряжения в нейтрали, но она продолжает оставаться опасной для изоляции нейтрали при приходе волны по трем фазам.

3. Увеличение числа отходящих линий снижает величину напряжения в нейтрали, но при этом оно продолжает оставаться опасным для изоляции нейтрали силовых трансформаторов.

4. Защитный аппарат, установленный в нейтрали трансформатора, обеспечивает надежную защиту изоляции нейтрали и работает в облегченных условиях, так как импульсное сопротивление обмоток трансформатора ограничивает ток через разрядник. Ток, протекающий через разрядник, даже при приходе молниевой волны по трем фазам не может превысить величину 0,6–0,9 кА для трансформаторов 6–35 кВ.

5. Максимально возможный импульсный ток в нейтрали определяется как допустимое напряжение молниевой волны для фазных выводов, деленное на импульсное сопротивление обмотки трансформатора (например, он будет равен 0,9 кА для трансформаторов 35 кВ).

Перейдем к вопросу о внутренних перенапряжениях в нейтрали.

В эксплуатации на изоляцию нейтрали в симметричном трехфазном режиме воздействует напряжение небаланса $\dot{U}_н = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C$, модуль которого обычно не больше нескольких десятков вольт.

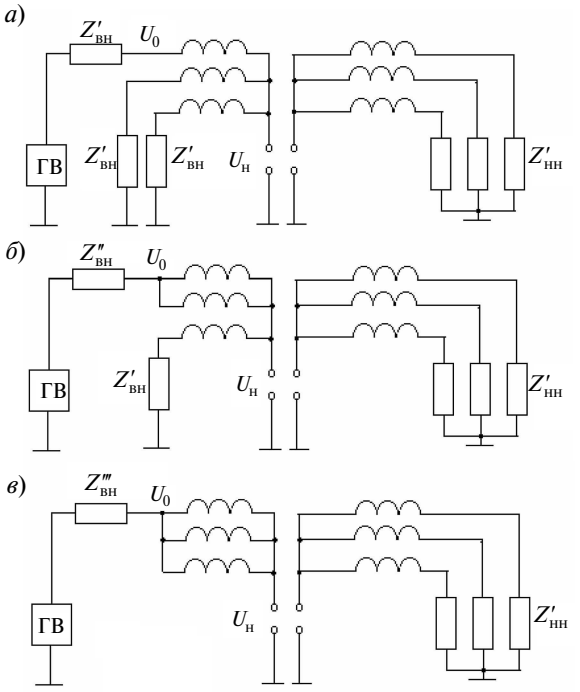


Рис. 1. Схемы измерений напряжения $U_н$ в нейтрали

Несимметричные режимы в сетях 6–35 кВ возникают при замыканиях одной фазы на землю и при неполнофазных (однофазных и двухфазных) режимах питания ненагруженных трансформаторов через ВЛ или кабельные линии.

При замыканиях одной из фаз на землю в сетях 6–35 кВ в нейтрали следует ожидать предельную величину $U_н$ на время замыкания

$$U_н = U_{м\,р}/\sqrt{3},$$

где $U_{м\,р}$ — максимальное рабочее напряжение сети.

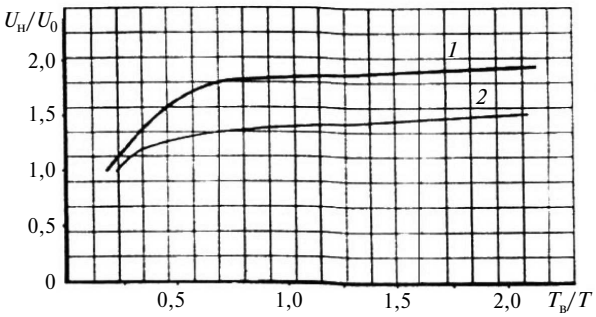


Рис. 2. Обобщенная кривая $U_н/U_о = f(T_в/T)$ для трансформаторов 35 кВ (кривая *1*) и 6–10 кВ (кривая *2*)

Поскольку в сетях 6, 10 и 35 кВ соответственно $U_{м\,р\,6} = 1{,}2 \cdot 6 = 7{,}2$ кВ; $U_{м\,р\,10} = 1{,}2 \cdot 10 = 12$ кВ и $U_{м\,р\,35} = 1{,}15 \cdot 35 = 40{,}5$ кВ, то в нейтрали трансформаторов следует ожидать напряжения $U_{н\,6} = 7{,}2/\sqrt{3} = 4{,}15$ кВ; $U_{н\,10} = 12/\sqrt{3} = 6{,}9$ кВ; $U_{н\,35} = 40{,}5/\sqrt{3} = 23{,}4$ кВ.

При неполнофазном включении трансформатора с изолированной нейтралью происходит последовательное включение индуктивности одной фазы с соединенными в параллель индуктивностями двух других фаз. Такое соединение обмоток фаз замещается индуктивностью (магнитным потоком), увеличенной в 1,5 раза по отношению к индуктивности (магнитному потоку) одной фазы.

Для уточнения характеристик намагничивания для трехстержневого трансформатора с учетом распределения магнитных потоков при его работе в неполнофазном режиме произведены соответствующие измерения.

На рис. 3 представлены результаты замеров и построены кривые намагничивания для силового трансформатора 35 кВ. При этом на графиках точками отмечены данные, полученные в процессе экспериментального определения названных зависимостей. Экспериментальные величины потока Ψ получены путем интегрирования напряжения.

Анализ результатов натурных измерений и численных расчетов позволяет утверждать, что

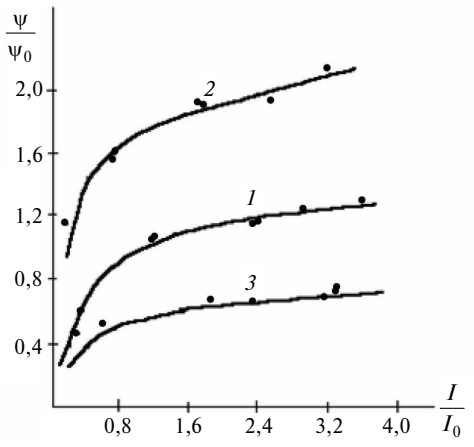


Рис. 3. Характеристики намагничивания:

1 — теоретическая зависимость для одной фазы трансформатора; *2* — экспериментальная зависимость при последовательном соединении обмоток трансформатора при неполнофазных режимах; *3* — экспериментальная зависимость при параллельном соединении двух фаз трансформатора

при неполнофазных режимах работы линии с трансформатором, имеющим изолированную нейтраль, в сети возможно возникновение феррорезонансных перенапряжений на частоте 50 Гц с кратностями $K_{max} \le 1{,}75$. Амплитуда этих перенапряжений зависит от отношения основных параметров — длины линии (l) и тока холостого хода трансформатора ($i_{хх}$) .

И, наконец, на изоляцию нейтрали трансформаторов 6–35 кВ будут воздействовать коммутационные перенапряжения. Однако они в нейтрали вызывают переходные процессы с кратностью $K_{max} \le 2{,}0$, что не представляет особой опасности как для нейтрали, так и для ДГР.

Таким образом, для изоляции нейтрали трансформаторов 6–35 кВ наибольшую опасность представляют молниевые перенапряжения. Для защиты нейтрали весьма успешно могут быть применены ограничители перенапряжений (ОПН).

Параметры ОПН для установки в нейтрали трансформаторов 6–35 кВ определяются по соответствующим электрическим и неэлектрическим воздействиям. ОПН, устанавливаемый в нейтрали, должен обеспечить защиту изоляции нейтрали от молниевых перенапряжений и выдержать без разрушения воздействия внутренних перенапряжений.

К электрическим воздействиям на ОПН для установки в нейтрали относятся: наибольшее рабочее напряжение ($U_{н\,р}$), наибольшее расчетное рабочее напряжение ($U_{р\,н\,р}$), разрядный ток ($I_р$), ток коммутационных перенапряжений ($I_к$), расчетный ток короткого замыкания ($I_{к\,з}$).

Приведенные выше результаты исследования полнофазных и неполнофазных режимов работы сети показывают, что в нейтрали трансформатора 6–35 кВ уровень квазистационарных перенапряжений не превышает значения фазного напряжения $U_ф$ и может продолжаться от полупериода промышленной частоты до времени ликвидации неполнофазного режима. Поэтому имея в виду возможные повышения напряжения в сети до $(1{,}15–1{,}2)\,U_ф$, с учетом 5 %-го запаса наибольшие рабочие напряжения для выбора защитных аппаратов для сетей 6–35 кВ нужно принять следующие:

для сети с $U_{ном} = 35$ *кВ*

$U_{н\,р} = 1{,}15 U_{ном}/\sqrt{3} = = 1{,}15 \cdot 35/\sqrt{3} = 23{,}4$ кВ;

$U_{р\,н\,р} = 1{,}05 U_{н\,р}/K_в = 1{,}05 \cdot 23{,}4/1{,}0 = 24{,}6$ кВ;

для сети с $U_{ном} = 10$ *кВ*

$U_{н\,р} = 1{,}2U_{ном}/\sqrt{3} = = 1{,}2 \cdot 10/\sqrt{3} = 6{,}94$ кВ;

$U_{р\,н\,р} = 1{,}05U_{н\,р}/K_в = 1{,}05 \cdot 6{,}94/1{,}0 = 7{,}3$ кВ;

для сети с $U_{ном} = 6$ *кВ*

$U_{н\,р} = 1{,}2U_{ном}/\sqrt{3} = = 1{,}2 \cdot 6/\sqrt{3} = 4{,}16$ кВ;

$U_{р\,н\,р} = 1{,}05U_{н\,р}/K_в = 1{,}05 \cdot 4{,}16/1{,}0 = 4{,}4$ кВ.

Если в сети с трансформаторами 6–35 кВ имеется защита от замыкания одной фазы на землю с уставкой $t_у$(с), то наибольшее расчетное рабочее напряжение $U_{р\,н\,р}$ для ОПН можно определить по формуле $U_{р\,н\,р} = U_{н\,р}/K_в$, где $K_в$ — коэффициент, определяемый по вольтвременным характеристикам ОПН при времени $t_у$.

Так, например, если $t_у = 0{,}5$ с для ОПН 6–35 кВ, то $K_в = 1{,}43$–$1{,}51$. Примем нижнюю границу этой области. При этом $U_{р\,н\,р\,6} = 4{,}4/1{,}43 = 3{,}07$ кВ; $U_{р\,н\,р\,10} = 7{,}3/1{,}43 = 5{,}1$ кВ; $U_{р\,н\,р\,35} = 24{,}6/1{,}43 = 17{,}2$ кВ;

Ограничители перенапряжений 6–35 кВ для установки в нейтрали, как отмечалось, работают в облегченных условиях: импульсный ток через них ограничен большим по величине эквивалентным импульсным сопротивлением трансформатора и составляет не более 0,6–0,9 кА. Поэтому ток от молниевых воздействий для этих ОПН можно принять равным 3 кА — минимальному значению импульсного тока, приведенному в ГОСТ.

Расчетный ток коммутационных перенапряжений через ОПН 6–35 кВ для установки в нейтрали трансформаторов — не более 80–100 А. С большим запасом его принимаем 200 А.

Обычно допустимая величина тока КЗ через ОПН ($I_{доп}$) несколько отличается от тока однофазного или трехфазного КЗ ($I_{кз}$) для данной установки. Так, для выбора ограничителей с токами срабатывания противовзрывного устройства до 40 кА значение $I_{доп}$ должно быть на 15–20 % больше значения $I_{КЗ}$. Для ОПН с $I_{доп} > 40$ кА введение запаса не требуется, т. к. в подавляющем большинстве случаев расчетные токи короткого замыкания в сетях 6–35 кВ меньше 30 кА.

Что же касается работы противовзрывных устройств защитных аппаратов, то, как показывают результаты испытаний, при максимальных значениях токов они должны эффективно обеспечивать необходимый результат за несколько сотых долей секунды, а при минимальных токах (порядка 0,5 кА) — за время до 0,5 с.

Ограничители перенапряжений эксплуатируются в районах с различными условиями загрязнения. Поэтому обычно для их внешней изоляции нормируется путь утечки в соответствии с ГОСТ 9920. При этом удельная длина пути утечки для ОПН выбирается не менее чем на 20 % выше, чем таковая для остального электрооборудования электроустановки, например подстанции.

Если удельная длина пути утечки $\lambda_у$ не оговаривается, то она должна быть не менее 1,8 см на 1 кВ наибольшего рабочего линейного напряжения сети. Вместе с тем для загрязненных районов величина $\lambda_у$ может составить $\lambda_у = 3{,}1$–$3{,}5$ см на 1 кВ наибольшего рабочего линейного напряжения сети.

Высота выше уровня моря, не оказывая существенного влияния на конструкцию, сказывается главным образом на внешней изоляции ограничителей перенапряжений.

Так, например, если ОПН рассчитан на работу на открытом воздухе на высоте не более $H = 1000$ м, то его эксплуатация на высоте $H > 1000$ м при пониженной плотности воздуха может привести к перекрытию внешней изоляции. Поэтому при этих условиях внешняя изоляция аппарата должна быть усилена.

В табл. 3 приведенны требования к нелинейным ограничителям для установки в нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ.

В таблице: $U_{ном}$ — номинальное напряжение аппарата; $U_{н\,дл}$ — наибольшее длительное напряжение, допустимое на аппарате; $I_{р\,ком}$ — расчетный коммутационный ток через аппарат, имеющий параметры 1,2/2,5 мс, выдерживаемый не менее 20 раз; $U_{ост}$ — остающееся напряжение при расчетном токе волны 1,2/2,5 мс; $I_{г\,и}$ — расчетный ток молниевых импульсов (8/20 мкс), выдерживаемый не менее 20 раз; $U_{ост\,в}$ — остающееся напряжение при расчетном токе волны 8/20 мкс.

Кроме того, следует отметить, что ОПН средних классов напряжения должны выдерживать механические нагрузки от вибрации по группе условий эксплуатации ГОСТ 17516, обладать сейсмоустойчивостью по MSC-64 и иметь соответствующее климатическое исполнение по ГОСТ 15150–89.

В последние десятилетия в ОАО НПО «Стример» (г. Санкт-Петербург) разработан и внедрен в эксплуатацию ряд новейших аппаратов, устанавливаемых на воздушных линиях для

Таблица 3

Требования к ОПН для установки в нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ

$U_{ном}$, кВ	$U_{н\ дл}$, кВ	$I_{р\ ком}$, А	$U_{ост}$, кВ	$I_{г\ и}$, А	$U_{ост\ в}$, кВ
6	4,4	200	7,6	2,5	10,5
10	7,3	200	12,4	2,5	17
35	25	200	42	2,5	60

улучшения показателя их молниезащиты. Самый новый из них — полимерный изолятор разрядник мультикамерный (ПИРМК) [7].

Применение ПИРМК-35 на подходах к подстанциям позволяет:

снизить вольт-секундную характеристику (ВСХ) линии электропередачи 35 кВ и тем самым улучшить молниезащиту подстанций;

существенно уменьшить вероятность токов короткого замыкания вблизи подстанций 35 кВ, влияющих на электродинамические усилия в обмотках силовых трансформаторов и вызывающих в неблагоприятных случаях повреждения их изоляции.

Таким образом, в нашем исследовании:

Оценена величина импульсных перенапряжений на изоляцию нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ и дугогасящих реакторов для компенсации токов однофазного замыкания на землю. Показано, что эти перенапряжения представляют серьезную опасность для названной изоляции.

Установлено, что квазиустановившиеся напряжения при замыканиях одной фазы на землю и коммутационные перенапряжения практически не представляют опасности для изоляции нейтрали и ДГР.

Сделан вывод, что с помощью схемных мероприятий следует избегать неполнофазные режимы питания ненагруженных трансформаторов 6–35 кВ, при которых возможны опасные феррорезонансные перенапряжения.

Изучены электрические и неэлектрические воздействия на ОПН 6–35 кВ для нейтрали и разработаны соответствующие технические требования.

Установлено, что применение ПИРМК-35 на подходах ВЛ 35 кВ уменьшает воздействие на электрооборудование подстанции набегающих волн, вызванных молниевыми перенапряжениями на линии.

Работы, описанные в статье, проводятся в рамках НИОКР Министерством образвоания и наука РФ (ГК 16.526.12.6006 от 13 мая 2011 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Халилов, Ф.Х.** Защита сетей 6–35 кВ [Текст] / Под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева— СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2002.— 259 с.

2. **Гольдштейн, В.Г.** Электромагнитная совместимость и разработка мероприятий по улучшению защиты от перенапряжений электрооборудования сетей 6–35 кВ [Текст] / В.Г. Гольдштейн, В.П. Степанов, Г.В. Подпоркин, Ф.Х. Халилов.— М.: Энергоатомиздат, 2009.— 344 с.

3. **Алиев, Ф.Г.** Перенапряжения в нейтрали силовых трансформаторов 6–220 кВ и методы их ограничения [Текст] / Ф.Г. Алиев, А.К. Горюнов, А.Н. Евсеев, А.И. Таджибаев, Ф.Х. Халилов— СПб.: Изд. ПЭИПК, 2001. —166 с.

4. **Костенко, М.В.** Грозозащита электрических сетей в районах с высоким удельным сопротивлением грунта [Текст] / М.В. Костенко, Ю.М. Невретдинов, Ф.Х. Халилов— Л.: Наука, 1984. —112 с.

5. **Созинов, А.В.** Анализатор переходных процессов в протяженных цепях [Текст]: Информационный листок/ А.В. Созинов, Ф.Х. Халилов— Л., 1979.— С. 2.

6. **Гольдштейн, В.Г.** Сопоставление расчетных и экспериментальных исследований атмосферных перенапряжений на подстанциях 110 кВ [Текст] / В.Г. Гольдштейн, А.В. Покровский,

Ф.Х. Халилов— Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.— 1977, № 3.— С. 16.

7. **Подпоркин, Г.В.** Грозозащита ВЛ 10–35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников [Текст] / Г.В. Подпоркин, Е.Ю. Енькин, Е.С. Калакутский, В.Е. Пильщиков, А.Д. Сиваев.— Электричество.— 2010. № 10.— С. 11.

ЗОЛОТЫХ Андрей Георгиевич — *директор по развитию ОАО «НПО “Стример”».*
195220, ул. Гжатская, д. 27, Санкт-Петербург, Россия
(812) 248-90-37
andrey.zolotykh@streamer.ru

ХАЛИЛОВ Фирудин Халилович — *доктор технических наук, профессор кафедры техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195220, ул. Гжатская, д. 27, Санкт-Петербург, Россия
(812) 555-45-85
natalia-shilina@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 66.017

А.А. Попович, Ван Цин Шен

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАТОДНОГО МАТЕРИАЛА Li_2FeSiO_4 ПУТЕМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИЗ АМОРФНОГО СОСТОЯНИЯ

A.A. Popovich, Wang Qing Sheng

RESEARCH TECHNOLOGY RECEIPT OF CATHODE MATERIAL Li_2FeSiO_4

Совершенствование литий-ионных аккумуляторов развивается по пути разработки новых катодных наноструктурированных материалов. Наибольший интерес проявляется к катодному материалу на основе силиката лития — Li_2FeSiO_4. Основной недостаток существующих технологий — низкие электрохимические свойства. В работе исследовалась принципиально новая технология получения Li_2FeSiO_4 — кристаллизация из аморфного состояния. Фазовый состав определяли на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE в CuKa-излучении. Тонкую структуру изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа Technai S-Twin G230, а распределение элементов по частице — с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira фирмы Tescan.

КАТОД. ЛИТИЙ-ИОННЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ АККУМУЛЯТОР. ЛИТИЙ. СИЛИКАТ. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ.

Currently improving lithium-ion batteries developed towards the development of new cathode nanostructured materials. Largest interest has to cathode materials based on lithium silicate — Li_2FeSiO_4. The main drawback of existing technologies — low electrochemical properties. In this paper research new technology of obtaining Li_2FeSiO_4 — crystallization from amorphous state. Phase composition was determined on Bruker D8 ADVANCE diffractometer in CuKa-radiation. The fine structure was studied using transmission electron microscopy Technai S-Twin G230, the distribution of elements on the particle was studied using a scanning electron microscope Mira Tescan.

CATHODE. LITHIUM-ION BATTERY. LITHIUM. SILICATE. CRYSTALLIZATION.

Литий-ионные акккумуляторы широко используются для энергоснабжения самых разнообразных автономных объектов, в числе которых и электронные портативные приборы: ноутбуки, сотовые телефоны, цифровые видеокамеры, DVD- и MP3-проигрыватели. Литий-ионные аккумуляторы представляют большой интерес и весьма перспективны для автомобильной, космической, авиационной, судостроительной промышленности.

Совершенствование литий-ионных аккумуляторов идет в направлении обеспечения баланса между емкостью, удельной мощностью, плотностью энергии, рабочей температурой и стоимостью аккумулятора. Над этой проблемой работают ученые всего мира. Каждый год в научных лабораториях создаются более совершенные литий-ионные аккумуляторы, которые успешно внедряются в промышленное производство. Лидерами в исследованиях и производстве литий-ионных аккумулторов являются Япония, США, Южная Корея, Франция, Германия, Канада, Китай [1–3]. На рис. 1 представлены диаграммы, характеризующие основные свойства (удельная энергия, удельная мощность, надежность, производительность, срок

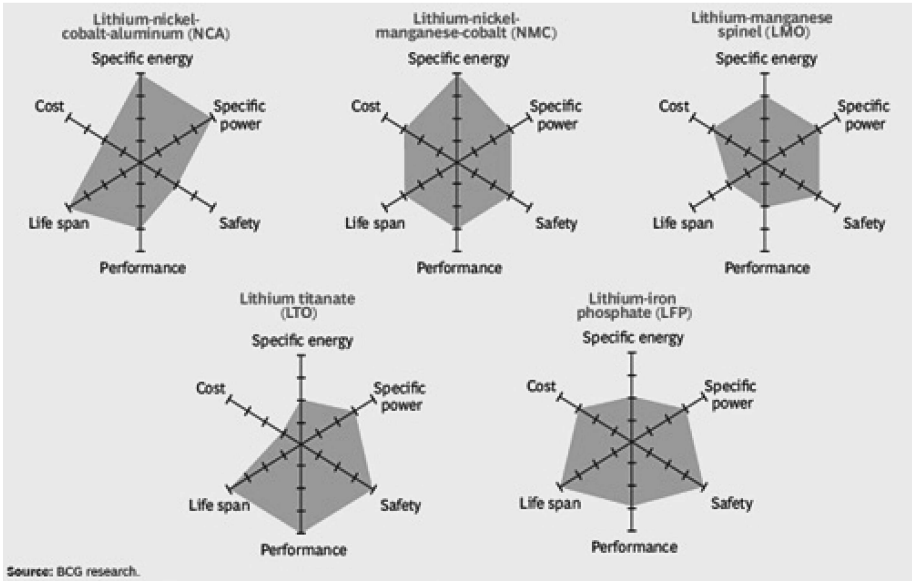


Рис. 1. Диаграммы, характеризующие основные свойства современных катодных материалов [4]

службы и цена) современных катодных материалов [4]. Суть этих диаграмм сводится к тому, что чем дальше форма шестиугольника распространяется наружу по оси, тем более сбалансированы свойства аккумулятора. Например, титанат лития обладает высокой производительностью, надежностью и сроком службы (количество циклов заряд/разряд), но при этом имеет высокую стоимость и низкую удельную энергию. Наиболее сбалансированным можно считать катод на основе шпинели никель — марганец — кобальт ($LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}$), так как при достаточно невысокой цене данный материал имеет высокие удельную энергию, мощность, надежность и срок службы.

Но какими бы функциями и характеристиками не обладали современные катодные материалы, остается очень весомый «минус» — емкость батарей недостаточна для обеспечения продолжительной работы прибора в автономном режиме. На рис. 2 приведен баланс энергетической плотности для современных катодных материалов [5].

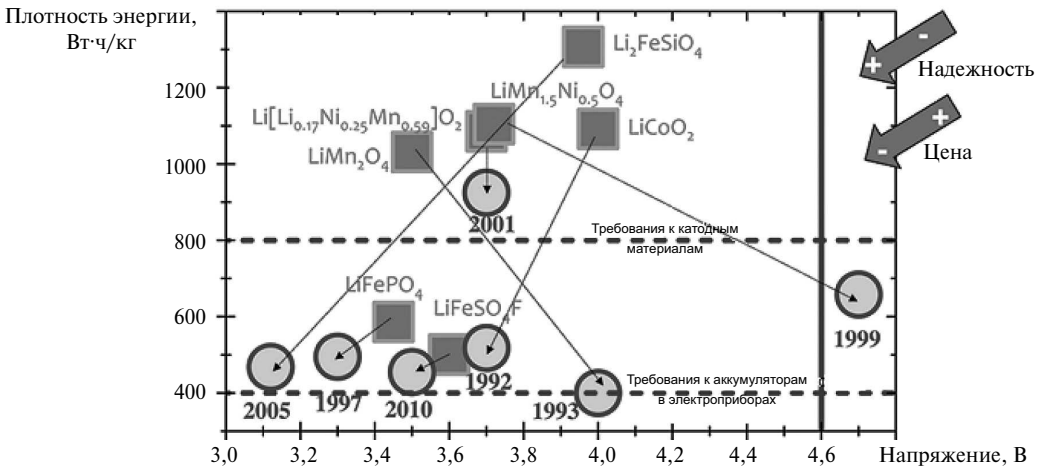


Рис. 2. Баланс энергетической плотности для различных современных катодных материалов [5]
(■ —теоретически, ○ — практически)

Как видно из рисунка, самый перспективный материал — катод на основе силиката Li_2FeSiO_4.

Впервые Li_2FeSiO_4 был получен в начале 2000-х. Данное соединение в зависимости от температуры получения имеет три модификации: низко- (450–500 °C), средне- (700–800 °C) и высокотемпературную (900 °C) (рис. 3) [6]. Низкотемпературная модификация имеет равномерную упорядоченную структуру, в то время как у высокотемпературной — «хаос» внутри. Тип микроструктуры непосредственным образом влияет на свойства получаемого катодного материала: чем равномернее и упорядочение структура, тем выше свойства.

В настоящее время Li_2FeSiO_4 получают двумя способами: твердофазным синтезом и по технологии «золь — гель». Температура получения Li_2FeSiO_4 твердофазным синтезом составляет 800–900 °C, по технологии «золь — гель» — 700–800 °C. Максимально известная емкость аккумулятора, полученного с таким катодом, — 166 мА·ч/г, что гораздо ниже теоретической емкости Li_2FeSiO_4 (330 мА·ч/г) [7].

Недостатки существующих технологий: невозможность получения низкотемпературной модификации, обладающей повышенными свойствами; неоднородность состава; низкие электрохимические свойства.

С учетом изложенного в нашей работе исследуется принципиально новая технология получения Li_2FeSiO_4 путем кристаллизации из аморфного состояния.

Для получения катодных материалов литий-ионных полимерных аккумуляторов используются соединения на основе оксидных систем, содержащих литий. В качестве базового соединения применяются Li_2SiO_3 и $Li_2Si_2O_5$. Один из способов получения данных соединений — сплавление Li_2O и SiO_2. При определенном соотношении данные соединения образуют легкоплавкую эвтектику (рис. 4).

В качестве исходных компонентов использовались порошки SiO_2 и Li_2CO_3. Исходные компоненты брались в количестве 68 % мол. SiO_2, остальные — Li_2O (при данном соотношении исходных компонентов образуется легкоплавкая эвтектика), перемешивались и сплавлялись при температуре 1100–1200 °C. При дальнейшем исследовании данной системы в ходе плавки в исходную смесь в качестве допирующего элемента

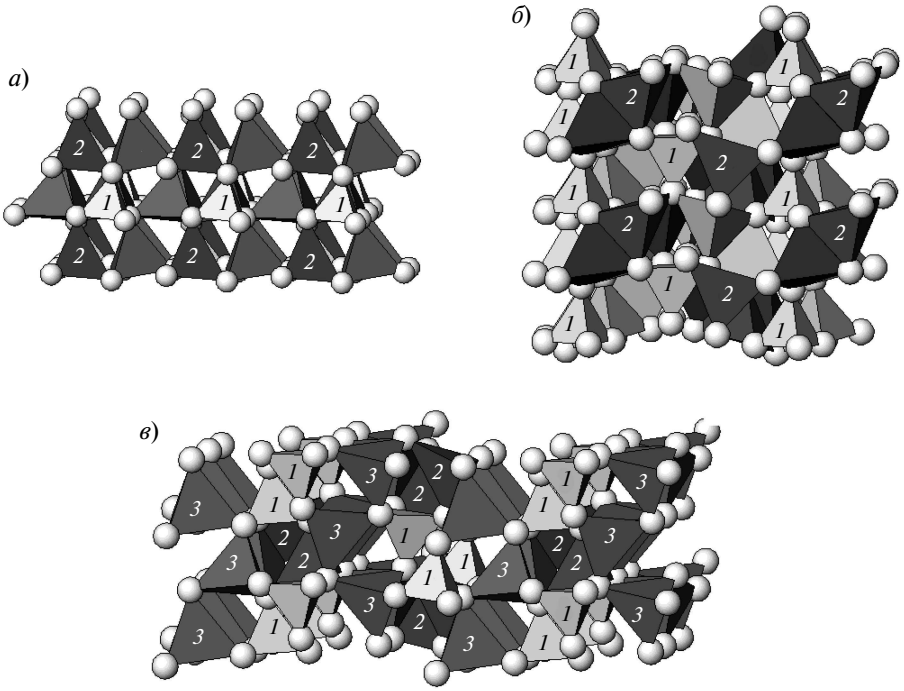


Рис. 3. Структуры: низкотемпературная (*а*), среднетемпературная (*б*) и высокотемпературная (*в*) модификаций Li_2FeSiO_4. Здесь показаны SiO_4 (*1*); FeO_4 (*2*); LiO_4 (*3*) [6]

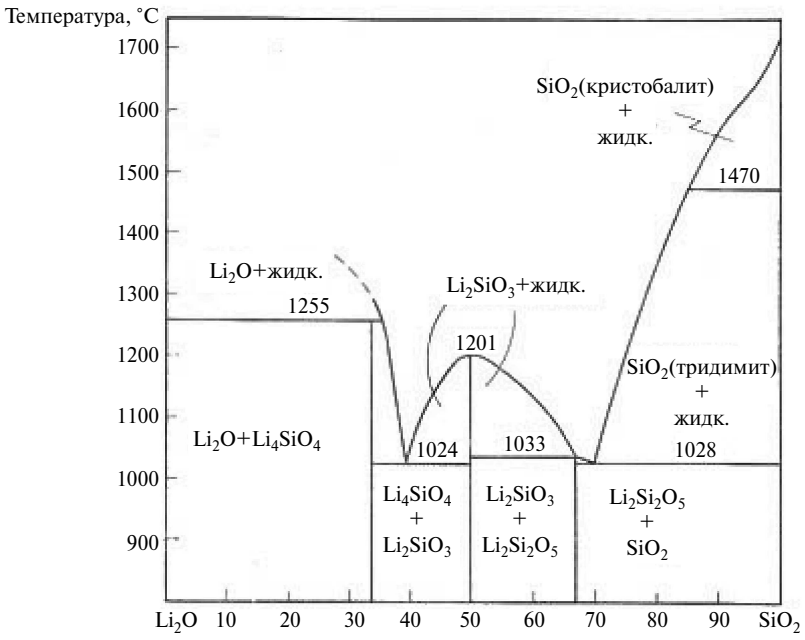


Рис. 4. Диаграмма фазового состояния системы Li_2O–SiO_2

добавлялся FeO ($FeCO_3$) в количестве от 5 до 45 % масс. Полученный расплав охлаждался на воздухе, в результате чего получался материал с аморфной структурой (рис. 5). Фазовый состав образцов определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE (Германия) в CuKα-излучении по стандартной методике (U = 40 кВ, I = 40 мА). Тонкую структуру сплавов изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения Technai S-Twin G230. Структуру и распределение элементов по частице изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira фирмы Tescan.

С помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (AAS) было измерено содержание Li в полученных образцах — около 8,0 % масс.

Для кристаллизации полученного сплава применялась термообработка двух типов: одноступенчатая (500 °C, 9 часов) и двухступенчатая, когда на первом этапе (450–470 °C) происходит зародышеобразование в сплаве, на втором (650–700 °C) — сама кристаллизация.

На рис. 6 приведен фазовый состав сплава системы Li_2O — 35 %FeO — SiO_2 после одноступенчатой термообработки. Из данной дифрактограммы видно, что после 9 часов термообработки при 500 °C полученный сплав начинает кристаллизоваться. Первая образующаяся фаза — Li_2SiO_3; она представляет собой смесь аморфной и нанокристаллических структур с размером нанокристаллов до 30 нм, что подтверждается данными просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (рис. 7). При проведении детального исследования снимков с ПЭМ было установлено, что межплоскостное расстояние равно 4,7 Å; это соответствует параметру решетки a = 4,66 фазы Li_2SiO_3 (карточка базы данных 29–829).

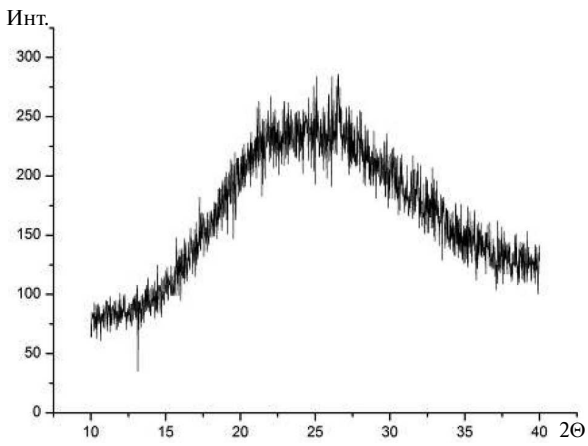


Рис. 5. Фазовый состав сплава Li_2O — 35 %FeO — SiO_2 после сплавления и охлаждения на воздухе (аморфная структура)

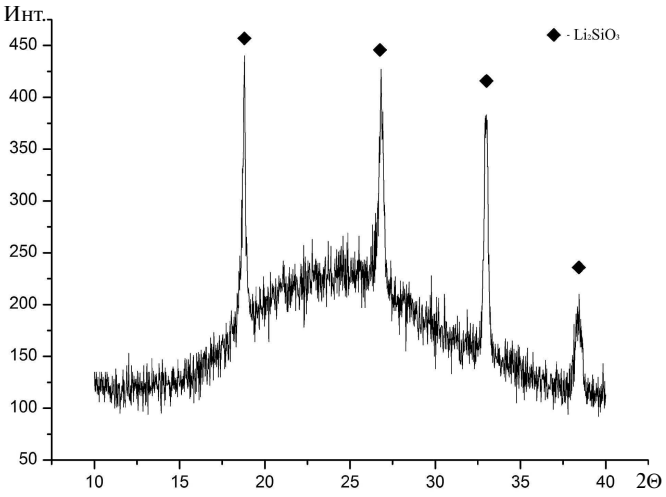


Рис. 6. Фазовый состав сплава системы Li_2O — 35 %FeO — SiO_2 после одноступенчатой термообработки

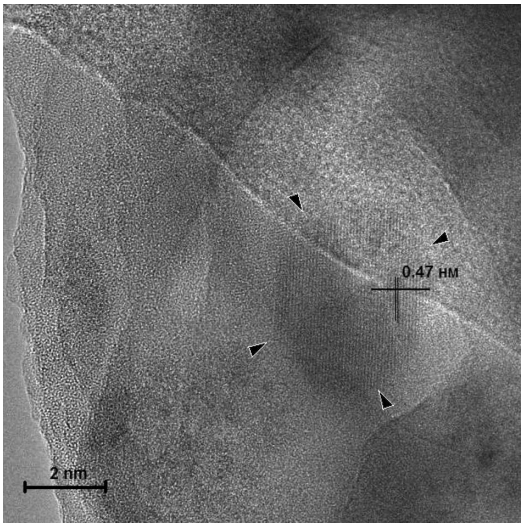


Рис. 7. Тонкая структура сплава системы Li_2O — 35 %FeO — SiO_2 после одноступенчатой термообработки. Снимок получен на ПЭМ

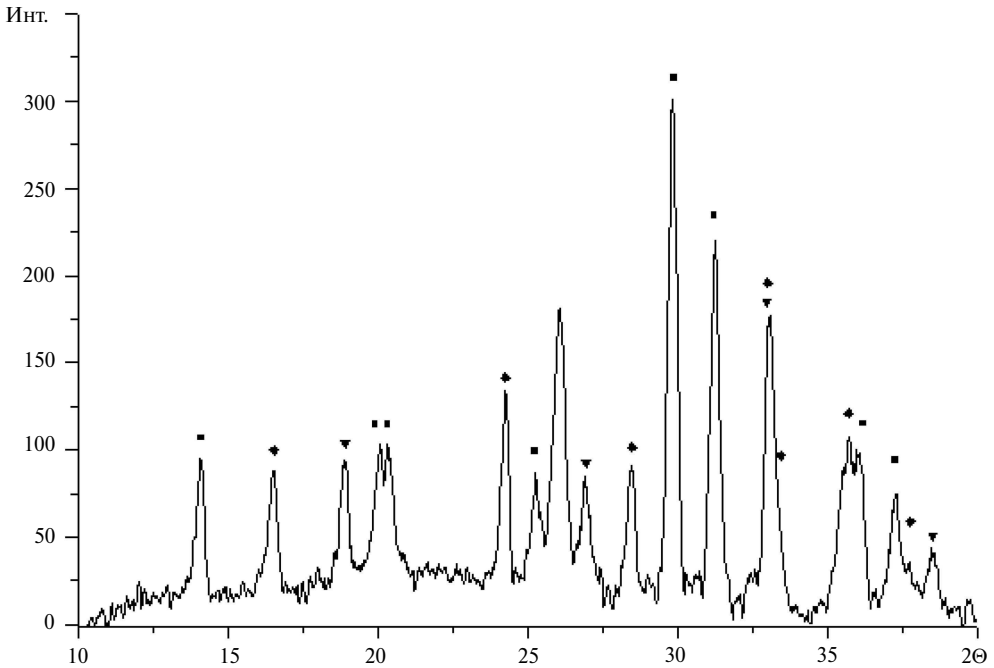


Рис. 8. Фазовый состав сплава системы Li_2O — 35 %FeO — SiO_2 после двухступенчатой термообработки (■ — $LiFeSiO_6$; ▼ — $Li2SiO_3$; ♦— $Li2FeSiO_4$)

На рис. 8 приведен фазовый состав сплава системы Li_2O — 35 %FeO — SiO_2 после двухступенчатой термообработки в течение 30 минут. После термической обработки в сплавах системы Li_2O — FeO — SiO_2 происходит образование кристаллической фазы с различной морфологией выделений в зависимости от содержания FeO.

На рис. 9–11 показана морфология выделений и распределение элементов в сплаве системы Li_2O — FeO — SiO_2 в зависимости от содержания FeO. Видно, что выделения имеют дендритную морфологию, которая может негативно сказаться на электрохимической емкости материала. Возможно, для измельчения структуры при кристаллизации необходимо допирование элементами, которые будут выступать в качестве центров кристаллизации.

К основным результатам работы можно отнести следующее:

Получены материалы системы Li_2O — FeO — SiO_2, которые могут быть использованы в качестве катода для литий-ионных аккумуляторов.

Установлены особенности фазообразования при кристаллизации из аморфной фазы.

Методами РФА и просвечивающей электронной микроскопии исследован фазовый состав и тонкая структура, полученного сплава. Установленно, что он представляет собой смесь

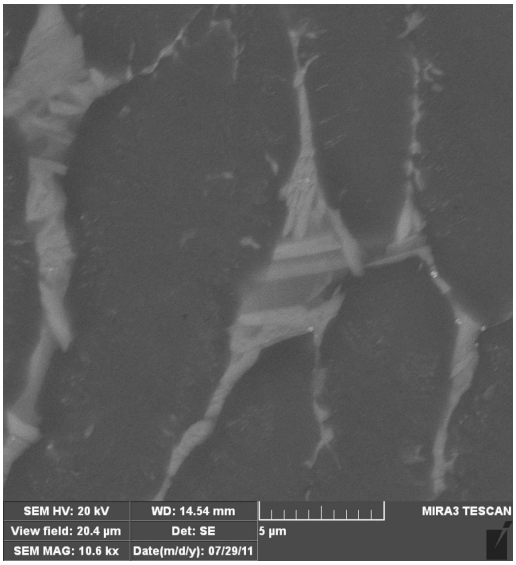


Рис. 9. Морфология выделений в сплаве системы Li_2O — 10 %FeO — SiO_2 после двухступенчатой термообработки

аморфной и нанокристаллической структуры с размером нанокристаллов от 4–30 нм.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом № 11.519.11.6016 на выполнение научно-исследовательских работ для государственных нужд в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

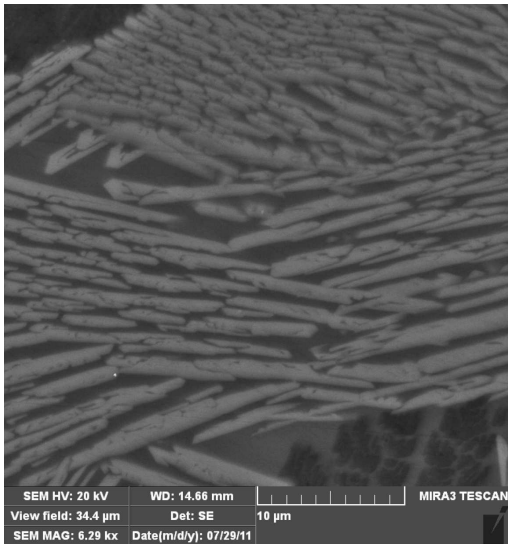


Рис. 10. Морфология выделений в сплаве системы Li_2O — 25 %FeO — SiO_2 после двухступенчатой термообработки

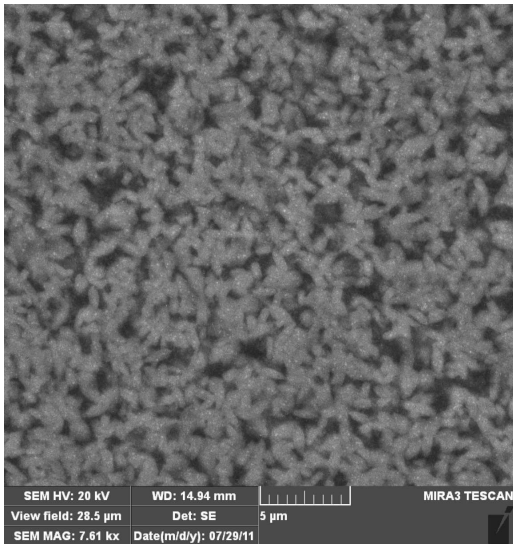


Рис. 11. Морфология выделений в сплаве системы Li_2O — 40 %FeO — SiO_2 после двухступенчатой термообработки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кедринский, И.А.** Литиевые источники [Текст] / И.А. Кедринский, В.Е. Дмитренко, И.И. Грудянов.— М.: Энергоатомиздат, 1992.

2. **Багоцкий, В.С.** Химические источники тока [Текст] / В.С. Багоцкий, А.М. Скундин.— М.: Энергоиздат, 1981.— С. 169–183.

3. **Таганова, А.А.** Герметичные химические источники тока для портативной аппаратуры [Текст]: Справочник / А.А. Таганова, И.А. Пак.— М.: Химиздат, 2003.

4. Battery University [Электрон. ресурс].— [сайт]. URL: http://batteryuniversity.com

5. Recent Advances in First Principles Computational Research of Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries [Электрон. ресурс] / Y.S. Meng, M.E. Arroyo-de Dompablo // Accounts of chemical researcher, 2012. URL: http://pubs.acs.org

6. **Armstrong, A.R.** Polymorphism in Li_2FeSiO_4: a variable temperature neutron diffraction study [Текст] / A.R. Armstrong, C. Sirisopanaporn, R. Dominko [et all.] // Proc. of the Conference «Electrode materials».— Arcachon, France 12–17 Juin 2011.

7. **Nishimura, S.** Structure of Li_2FeSiO_4 [Текст] / S. Nishimura, S. Hayase, R. Kanno [et all.] // American Chemical Society.— 2008, № 130.— P. 13212–13213.

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич — *доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой технологии и исследования материалов, исполнительный директор ОНТИ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-98-29;
popovicha@mail.ru

Ван Цин Шен — *аспирант кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-98-29

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 669.1.017:669.018.44:669:018.28:621.74.011

Г.П. Анастасиади, С.Ю. Кондратьев,
А.С. Орыщенко, М.Д. Фукс

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ЛИТОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА 45Х26Н33С2Б2

G.P. Anastasiadi, S.Yu. Kondratyev,
A.S. Orischenko, M.D. Fuks

THE EFFECT OF COOLING SPEED BY TECHNOLOGICAL THERMAL CYCLING ON THE LONG-TERM STRENGTH OF CAST HEAT-RESISTANT ALLOY 45CR26NI33SI2NB2

Экспериментально определена длительная прочность литого жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150°С после предварительной выдержки при 1150 °С длительностью 2–100 ч с последующим охлаждением в воде. Установлено, что ускоренное охлаждение от рабочей температуры до комнатной в начальный период эксплуатации способствует повышению длительной прочности сплавов на Fe-Cr-Ni основе по сравнению с литым состоянием и в значительной степени предотвращает снижение рабочих характеристик жаропрочных сплавов на основе системы Fe-Cr-Ni при эксплуатации.

ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ. ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. РЕСУРС ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

Experimentally determined was a long-term strength of cast superalloy 45Cr26Ni33Si2Nb2 at 1150 °C after preliminary curing at 1150°C during 2 to 100 hours, followed by cooling in water. It was found that rapid cooling from the operating temperature to room temperature during the initial period of operation contributes to long-term strength of Fe-Cr-Ni-based alloys compared to cast state and largely prevents reduction of performance characteristics of superalloys based on the system Fe-Cr-Ni during operation.

CAST HEAT-RESISTANT ALLOYS. LONG-TERM STRENGTH. HEAT TREATMENT. REMAINING LIFE OF THE HIGH-TEMPERATURE EQUIPMENT.

Наличие технологических циклов «нагрев — охлаждение», связанных с необходимостью остановок высокотемпературного оборудования нефтехимических и металлургических производств для проведения регламентных работ, значительно усложняет влияние условий эксплуатации на ресурс конструкционных материалов, используемых для его изготовления [1, 2]. Экспериментальные исследования, результаты которых рассмотрены в нашей работе [3], показали, что медленное охлаждение с печью после предварительной выдержки при 1150 °С длительностью 2–100 ч приводит к снижению длительной прочности литого жаропрочного жаростойкого сплава 45Х26Н33С2Б2. Причина снижения рабочих характеристик жаропрочных сплавов на основе системы Fe-Cr-Ni — протекание в них фазовых превращений как при температуре эксплуатации, так и в процессе медленного охлаждения до комнатной температуры. При этом кататермический режим (медленное непрерывное охлаждение с печью заготовок деталей или аналогичное ему естественное технологическое охлаждение оборудования при остановке на обслуживание) оказывает большее отрицательное влияние на длительную прочность сплавов по

сравнению с изотермической выдержкой и ускоренным охлаждением, особенно в начальный период эксплуатации. Таким образом, целенаправленное регулирование скорости охлаждения при технологических термоциклах может позволить повысить работоспособность сплавов и увеличить ресурс работы высокотемпературного оборудования.

Цель данной работы — исследование влияния скорости охлаждения в циклах «нагрев — охлаждение» на длительную прочность широко применяемых в нефтехимической промышленности литых жаропрочных жаростойких сплавов системы Fe-Cr-Ni в условиях, имитирующих реальный режим эксплуатации змеевиковых систем высокотемпературных установок.

Материал исследования — жаропрочный сплав 45Х26Н33С2Б2, разработанный ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и используемый для изготовления радиантных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза [4]. Сплав выплавляли в индукционной печи емкостью 500 кг на чистых шихтовых материалах и разливали в песчаные формы — стандартные клиновые литейные пробы (ГОСТ 977–88). Фактический химический состав, %, исследованного сплава 45Х26Н33С2Б2 приведен ниже:

C	0,46
Si	1,73
Mn	1,31
Cr	25,5
Ni	35,6
Nb	1,60
W	0,59
Mo	0,31
Ti	0,21
N	0,05
Fe	Ост.

Испытания на длительную прочность проводили по ГОСТ 10145–81 на оригинальной установке, изготовленной на базе нагружающей машины АИМА-2 и электрической печи типа СШОЛ с нагревательной спиралью из фехралевой проволоки марки 0Х27ЮТ. Точность измерения температуры испытываемого образца составляла ± 2°С. Образцы (рис. 1) изготавливали в соответствии с ГОСТ 10145–81 «Металлы. Методы испытания на длительную прочность» и СТП 90.067–87, являющимся стандартом предприятия ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» (№ 140, тип 6). Анализ изломов образцов после испытаний выполняли на растровом электронном микроскопе «SEM 535».

Структуру сплава исследовали с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D FEG. Фазовый анализ сплава проводили с использованием микрорентгеноспектрального анализатора Tescan VEGA 5136 LM. Для выявления структуры сплава применяли электролитическое травление в десятипроцентной щавелевой кислоте. Изготовление и подготовку металлографических шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно ASTM E 3–95.

Испытания на длительную прочность проводили при температуре 1150 °С. Определяли длительную прочность сплава в литом состоянии и после предварительной термической обработки по режиму: выдержка при 1150 °С длительностью 2, 50 или 100 ч с последующим охлаждением в воде. Предварительная термическая обработка имитировала рабочую сессию установки пиролиза различной длительности с ускоренным охлаждением при технологической остановке.

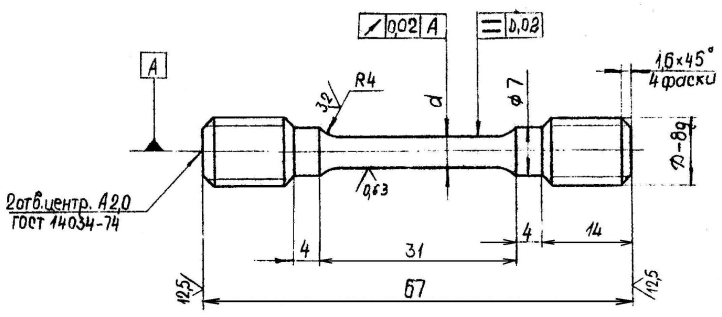


Рис. 1. Образец для испытаний на длительную прочность (ГОСТ 10145–81; d = 6,0±0,05 мм, D = М10)

Результаты испытаний на длительную прочность при 1150 °С сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии и после предварительной высокотемпературной выдержки различной длительности с последующим охлаждением в воде приведены в табл. 1 и на рис. 2. Видно, что кратковременная предварительная выдержка с последующим ускоренным охлаждением в воде не только не снижает длительную прочность литого сплава, а наоборот, значительно повышает эту характеристику. Так, уже после 2 часов предварительной выдержки с последующим охлаждением в воде значения длительной прочности сплава при температуре 1150 °С при напряжениях 10 и 12 МПа повышаются соответственно в 1,2 и 1,1 раза относительно литого состояния и в 1,9 и 1,7 раза по сравнению с охлаждением с печью. Увеличение времени предварительной выдержки до 50 часов при охлаждении в воде приводит к некоторому снижению длительной прочности сплава — до уровня, соответствующего литому состоянию, а при охлаждении с печью существенно снижает его — до 0,5–0,6 от уровня литого сплава. После предварительной выдержки длительностью 100 ч наблюдается значительное снижение этой характеристики: при охлаждении в воде — до 0,5–0,6, а с печью — до 0,3–0,4 от уровня литого состояния.

Таблица 1

Длительная прочность при температуре 1150°С сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом и предварительно термообработанном состояниях

Состояние сплава	Длительность выдержки τ, ч	Время до разрушения (ч) при напряжении	
		10 МПа	12 МПа
Литое	–	106	55
Нагрев до t = 1150 °С, выдержка τ и охлаждение с печью	2	67	36
	50	58	32
	100	49	15
Нагрев до t = 1150 °С, выдержка τ и охлаждение в воде	2	126	61
	50	103	53
	100	65	27

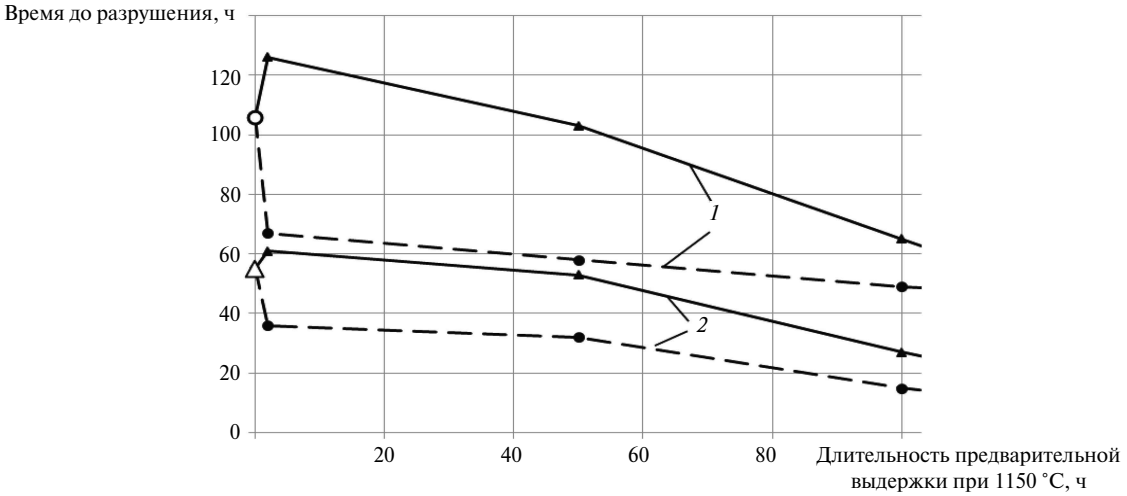


Рис. 2. Влияние времени предварительной выдержки при 1150 °С с последующим охлаждением в воде (▲) или с печью (●) на длительную прочность при 1150°С литого (○, Δ) сплава 45Х26Н33С2Б2 при напряжениях 10 (*1*, ○) и 12 (*2*, Δ) МПа

Сравнение длительной прочности сплава после предварительной выдержки при 1150 °С с охлаждением с печью и в воде показывает значительное преимущество ускоренного охлаждения при всех исследованных выдержках (см. табл. 1, рис. 2).

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что режим охлаждения от температуры эксплуатации до комнатной оказывает значительное влияние на длительную прочность сплава, причем не менее значимое, чем продолжительность высокотемпературной выдержки.

Анализ структуры и фазового состава сплава 45Х26Н33С2Б2, общие результаты которого рассмотрены в наших предыдущих публикациях [5–7], показал, что как в литом состоянии, так и после выдержки при 1150 °С с последующим охлаждением при различной скорости в сплаве присутствуют γ-твердый раствор, эвтектические колонии карбидов M_xC_y и включения, состоящие из нитрида титана и карбида ниобия. Однако высокотемпературная выдержка приводит к значительным качественным и количественным изменениям в структуре сплава по сравнению с литым состоянием, которые заключаются в трансформации всех структурных составляющих и отдельных фаз.

Так, одновременно с уменьшением степени химической неоднородности γ-твердого раствора после высокотемпературной выдержки изменяется его объемная доля в структуре сплава за счет процессов выделения — растворения промежуточных фаз. На рис. 3 видно, что после 2 часов выдержки при 1150 °С объемная доля промежуточных фаз в структуре сплава резко возрастает по сравнению с литым состоянием, причем при охлаждении с печью в 1,5 раза больше, чем при охлаждении в воде. С увеличением выдержки до 50 ч количество промежуточных фаз постепенно уменьшается: при охлаждении с печью почти до исходного, а при охлаждении в воде до значения примерно в 1,5 раза меньше, чем в литом состоянии. Дальнейшая выдержка (до 100 ч) незначительно изменяет соотношение структурных составляющих в сплаве.

Установлено, что уже после 2 часов выдержки в структуре литого сплава наблюдается постепенное превращение эвтектического карбида $(CrFeNi)_7C_3$ в карбид $(CrFeNi)_{23}C_6$. В результате этого превращения избыточный для $M_{23}C_6$ углерод образует выделения вторичных карбидов $(FeCrNi)_mC_n$, которые в виде дисперсных включений располагаются в матрице, преимущественно вблизи крупных эвтектических карбидов (рис. 4, 5). При увеличении длительности выдержки более 2 часов происходит последовательное образование промежуточных интерметаллидных фаз различного состава (см. табл. 2) с частичным растворением карбидов хрома и ниобия.

Для сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С характерно фрагментирование структуры, значительно более выраженное при охлаждении с печью (рис. 6).

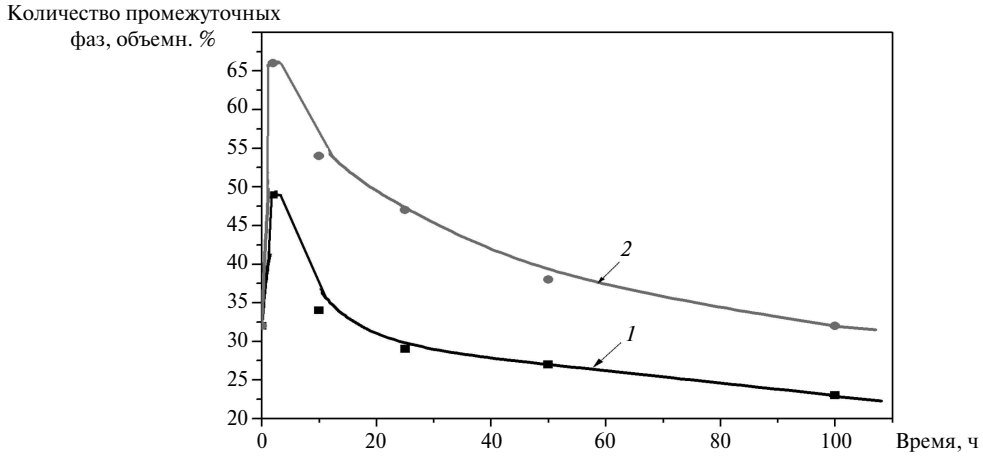


Рис. 3. Влияние длительности выдержки при 1150 °С на количество промежуточных фаз в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 после охлаждения в воде (*1*) или с печью (*2*)

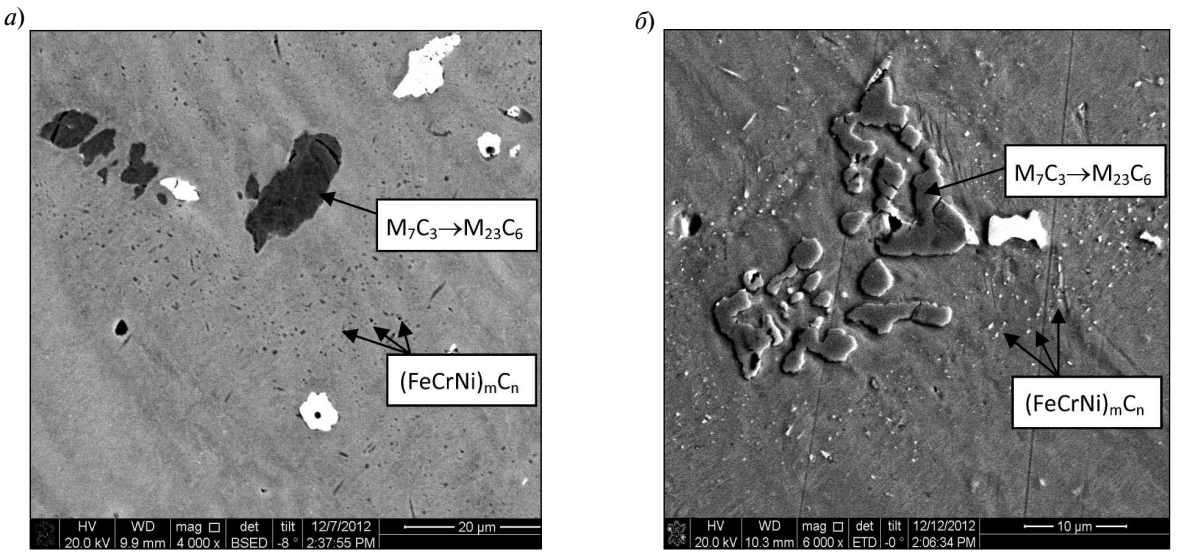


Рис. 4. Структура в обратно отраженных электронах (*а*) и во вторичных электронах (*б*) сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С длительностью 2 часа с последующим охлаждением в воде. РЭМ

Выявленные структурные изменения свидетельствуют о протекании различных фазовых превращений в сплаве 45Х26Н33С2Б2 при термическом воздействии. Они происходят не только при высокотемпературной выдержке, но и при охлаждении, особенно медленном — с печью. Так, в работах [8, 9] показано, что в интервале понижения температур 900–600 °С в Fe-Cr-Ni-сплавах исследуемой концентрационной области происходит карбидное превращение $M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$, а в [10] установлен переход в карбиде M_7C_3 орторомбической кристаллической решетки в гексагональную. Известно также, что при охлаждении таких сплавов в том же интервале температур в их структуре возможно образование различных интерметаллидных фаз (σ, *G*, *Z*, η, χ, Лавеса) вследствие уменьшения растворимости основных легирующих элементов в матричном γ-твердом растворе [11–13]. Соответственно изменяются и кристаллографические параметры матрицы. Протекание фазовых превращений при охлаждении может приводить к возникновению значительных внутренних напряжений в сплаве и, как следствие, фрагментированию структуры в результате термической полигонизации из-за фазового наклепа сильно легированного твердого раствора. Последнее должно приводить к снижению пластичности сплава.

На рис. 7 показано влияние предварительной термической обработки на пластические характеристики сплава 45Х26Н33С2Б2 в последующих испытаниях на длительную прочность при 1150 °С. Видно, что предварительная высокотемпературная выдержка длительностью 2 ч резко снижает пластичность сплава.

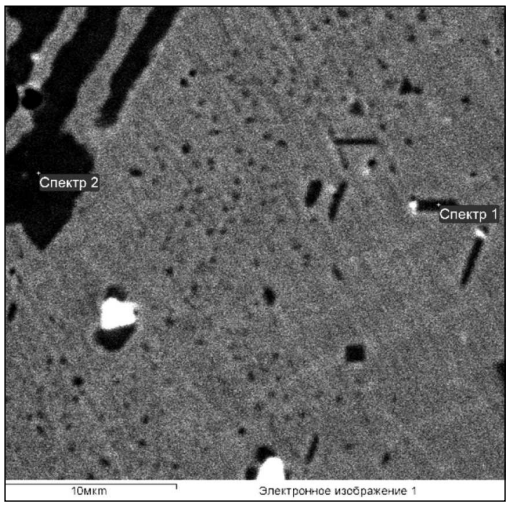


Рис. 5. Структура в обратно отраженных электронах и состав вторичных (спектр 1) и первичных (спектр 2) карбидов сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150°С длительностью 2 ч с последующим охлаждением с печью. РЭМ

Таблица 2

Состав первичных (*1*) и вторичных (*2*) карбидов сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С в течение 2 часов

№ спектра	Фаза	Содержание элементов, масс. %					
		C	Cr	Fe	Ni	Mo	W
1	$(FeCrNi)_mC_n)_mC_n$	8,24	31,54	30,25	28,45	0,58	0,94
2	$M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$	8,71	70,50	11,85	5,16	1,23	2,55

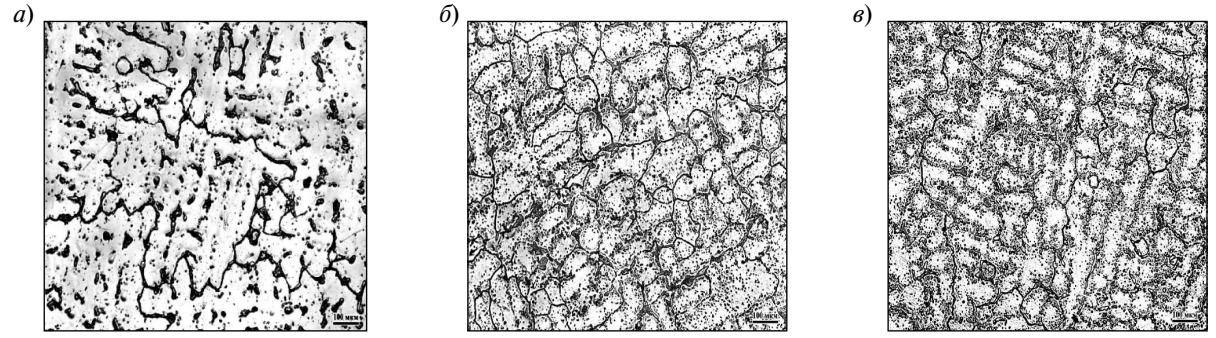


Рис. 6. Микроструктура сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии (*а*) и после выдержки при 1150 °С длительностью 25 (*б*) и 50 ч (*в*) с охлаждением с печью. ×100

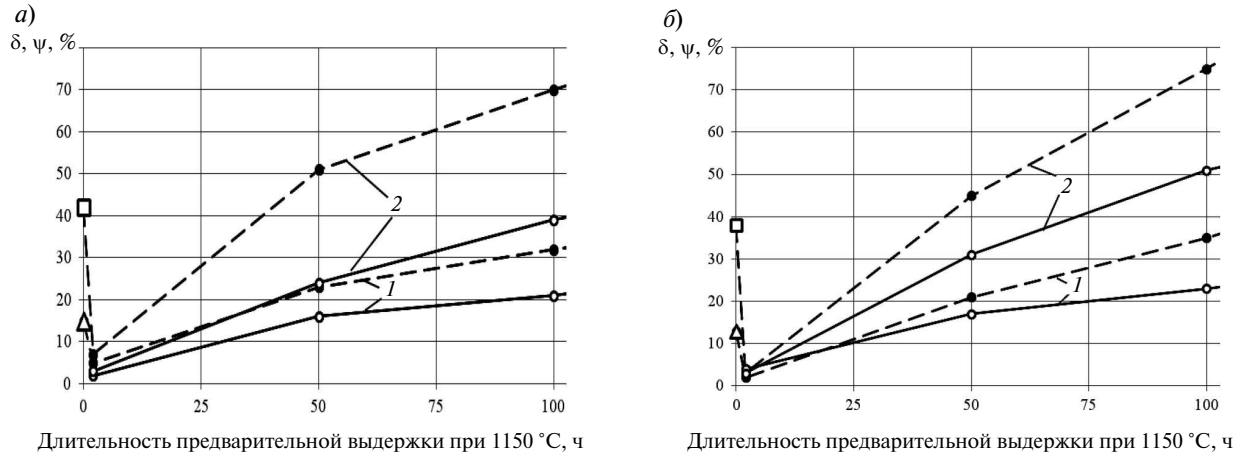


Рис. 7. Влияние времени предварительной выдержки при 1150 °С с последующим охлаждением в воде (○) или с печью (●) на относительные удлинение δ (*1*, Δ) и сужение ψ (*2*, □) в испытаниях на длительную прочность при напряжениях 10 (*а*) и 12 (*б*) МПа и температуре 1150°С литого (Δ, □) сплава 45Х26Н33С2Б2

Увеличение выдержки до 50 и 100 ч повышает пластические характеристики сплава по сравнению с литым состоянием, причем в случае охлаждения с печью рост пластичности больше, чем при охлаждении в воде.

Характерно, что разница между значениями относительных удлинения и сужения значительно больше в случае охлаждения с печью (рис. 7). Следовательно, при охлаждении с печью после предварительной высокотемператур-

ной выдержки сплава длительностью 50 и 100 ч в последующих испытаниях на длительную прочность при 1150 °С наблюдается преимущественно сосредоточенная деформация, а в случае охлаждения в воде деформация имеет значительно более равномерный характер. Это свидетельствует о большей степени разупрочнения структуры сплава при охлаждении с печью. С этим согласуется установленный факт присутствия в структуре сплава после охлаждения с печью в 1,5 раза большего количества промежуточных фаз по сравнению с охлаждением в воде (см. рис. 3). Следовательно, степень легированности матрицы после охлаждения с печью меньше, и, учитывая, что вторичные промежуточные фазы претерпевают постоянные превращения в процессе высокотемпературной выдержки, такая структура сплава менее стабильна.

Исследование структуры сплава после предварительной высокотемпературной выдержки при 1150 °С длительностью 2 ч показало, что размер выделяющихся вторичных карбидов при охлаждении с печью значительно больше, а форма их преимущественно отчетливо ограненная, в отличие от вторичных карбидов, выделяющихся при охлаждении в воде (рис. 8). Это позволяет считать, что при охлаждении с печью преобладает рост имеющихся дисперсных кристаллитов, а при охлаждении в воде — формирование новых центров роста. Последнее также может быть причиной большей деформационной стабильности структуры сплава в случае ускоренного охлаждения.

Вследствие высокотемпературного разупрочнения при увеличении длительности предварительной выдержки превращения, протекающие в сплаве при последующем охлаждении как с печью, так и в воде и сопровождающиеся формированием в структуре промежуточных фаз, не приводят к существенному снижению пластичности. Однако разупрочнение сплава после предварительной высокотемпературной выдержки 50 и 100 ч снижает длительную прочность сплава. При этом в случае охлаждения в воде длительная прочность сплава остается существенно выше, чем при охлаждении с печью.

Анализ изломов образцов сплава после испытаний на длительную прочность при 1150 °С показал, что во всех случаях характер разрушения — вязкий, преимущественно межзеренный, а поверхность имеет дендритную морфологию (рис. 9). Однако излом образцов, подвергнутых предварительной выдержке в течение 2 ч при 1150 °С, значительно более однородный по сравнению как с литым, так и предварительно термообработанными по другим режимам. Увеличение длительности предварительной выдержки приводит к большей локализации деформации в месте разрушения

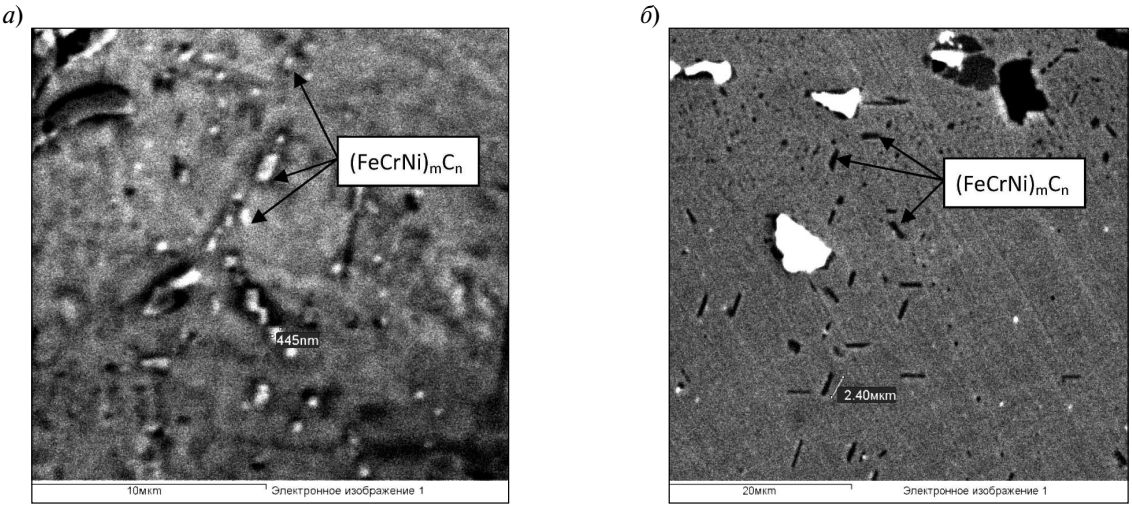


Рис. 8. Структура в обратно отраженных электронах и размер вторичных карбидов сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки 2 ч при 1150 °С с последующим охлаждением в воде (*а*) или с печью (*б*). РЭМ

образца и большей неоднородности и вязкости излома, особенно в случае охлаждения с печью после предварительной высокотемпературной выдержки. Следует отметить, что в изломах образцов сплава наблюдается, помимо межзеренного разрушения, значительное количество участков, имеющих внутризеренный характер разрушения, особенно при более длительных предварительных выдержках (рис. 9, 10). Это свидетельствует об относительно высокой длительной прочности сплава.

Для оценки уровня жаропрочности исследованного сплава с учетом влияния промежуточных охлаждений от рабочей температуры до комнатной целесообразно сопоставить экспериментально полученные значения его длительной прочности при 1150 °С с аналогичной характеристикой известных жаропрочных сплавов.

На рис. 11 представлена условная параметрическая диаграмма [14, 15] для сплава Х28Н48В5, построенная по данным [16] с использованием значений длительной прочности при температурах 1100 и 1200 °С. На этом же рисунке показаны значения длительной прочности исследованного сплава 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150 °С. Величину параметра для каждого испытания определяли по формуле

$$P_{д\,п} = T(\lg t_к + c)10^{-3}, \qquad (1)$$

где T — температура испытания, К; $\tau_к$ — время до разрушения, ч; c — постоянная. Величину постоянной c принимали равной 20.

Из полученных результатов следует, что по уровню жаропрочности сплав 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии соответствует сплаву Х28Н48В5. Видно, что после предварительной

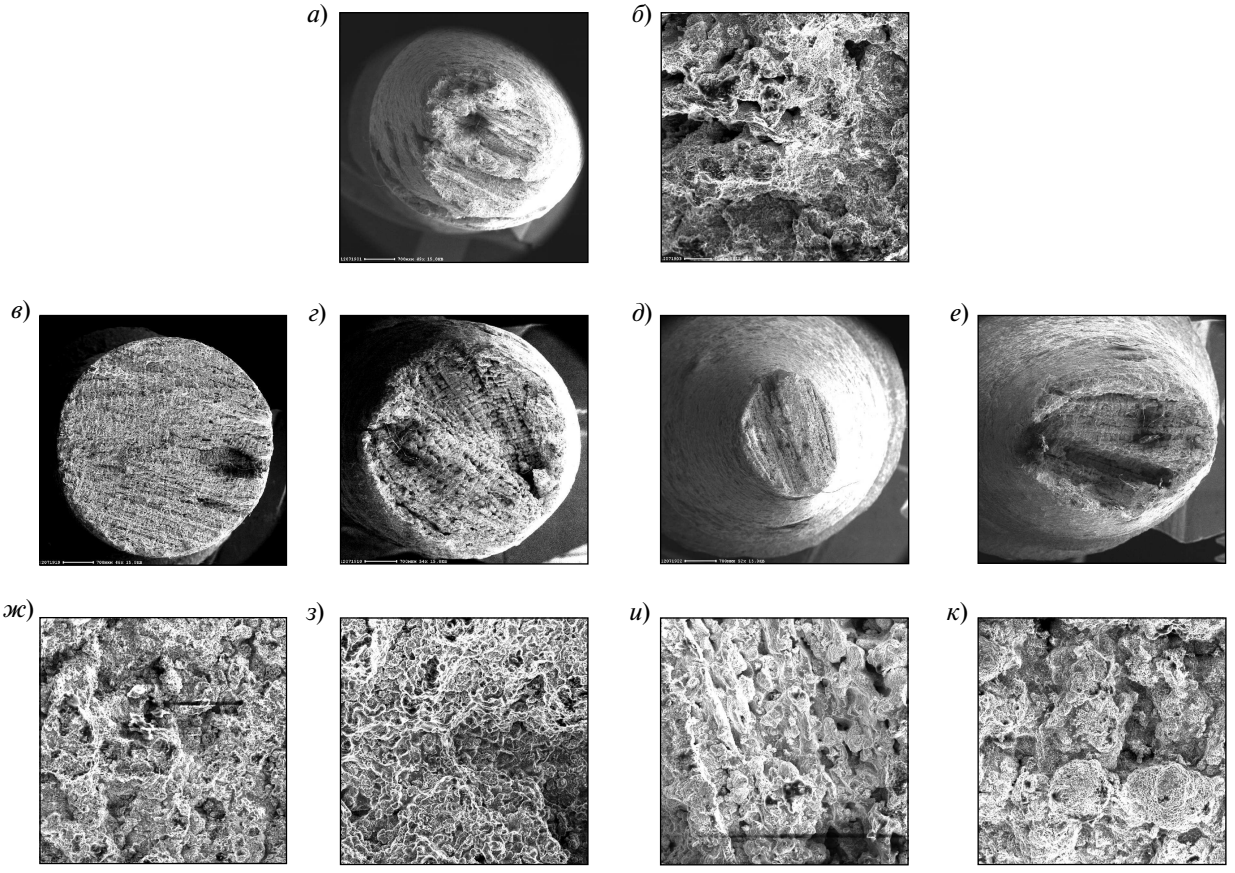


Рис. 9. Характер излома после испытаний на длительную прочность (t = 1150 °С, σ = 12 МПа) образцов сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии (*а*, *б*) и после предварительной выдержки при 1150 °С длительностью 2 (*в*, *г*, *ж*, *з*) и 100 ч (*д*, *е*, *и*, *к*) с последующим охлаждением с печью (*в*, *д*, *ж*, *и*) или в воде (*г*, *е*, *з*, *к*). ×50 (*а*, *в*–*е*), ×1000 (*б*, *ж*–*к*)

высокотемпературной выдержки при температуре 1150 °С с охлаждением в воде значения длительной прочности исследованного сплава находятся несколько выше, а с охлаждением с печью — ниже по сравнению с литым состоянием (см. рис. 11). Однако все экспериментальные точки лежат в области длительной прочности сплава Х28Н48В5.

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что отрицательное влияние кататермического режима эксплуатации (медленное непрерывное охлаждение) на длительную прочность сплава 45Х26Н33С2Б2 может быть значительно уменьшено за счет применения ускоренного охлаждения в температурном интервале 900–600 °С при остановке высокотемпературных установок для проведения регламентных работ, особенно в начальный период эксплуатации. Применение кратковременной высокотемпературной термической обработки с ускоренным охлаждением заготовок деталей оборудования также может повысить ресурс его эксплуатации.

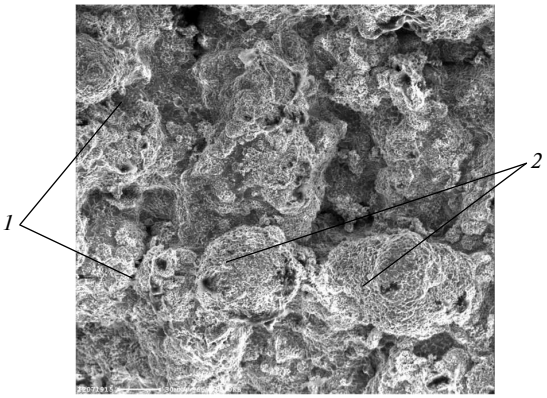


Рис. 10. Характер излома после испытаний на длительную прочность (t = 1150 °С, σ = 12 МПа) образцов сплава 45Х26Н33С2Б2 после предварительной выдержки при 1150 °С длительностью 100 ч с последующим охлаждением в воде: *1* — области межзеренного разрушения, *2* — области внутризеренного разрушения. ×1000

Основные выводы, сделанные по результатам работы:

Определена длительная прочность при температуре 1150 °С сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии и после предварительной выдержки при 1150 °С длительностью 2–100 ч с последующим охлаждением в воде. Установлено положительное влияние ускоренного охлаждения после предварительной выдержки при температуре эксплуатации на длительную прочность сплавов на Fe-Cr-Ni основе.

Ускоренное охлаждение в значительной степени предотвращает снижение рабочих характеристик жаропрочных сплавов на основе системы Fe-Cr-Ni при эксплуатации за счет затормаживания процессов выделения хрупких промежуточных фаз и обеднения матричного твердого раствора легирующими элементами при охлаждении от рабочей температуры до комнатной.

Ускоренное охлаждение от рабочей температуры до комнатной в начальный период эксплуатации способствует повышению длительной прочности сплавов на Fe-Cr-Ni основе по сравнению с литым состоянием за счет выделения относительно небольшого количества нанораз-мерных промежуточных фаз, равномерно упрочняющих структуру сплава.

Для увеличения ресурса работы высокотемпературного оборудования, изготовленного из жаропрочных жаростойких сплавов на основе системы Fe-Cr-Ni, необходимо регламентировать кататермический режим эксплуатации, — количество технологических циклов «нагрев —

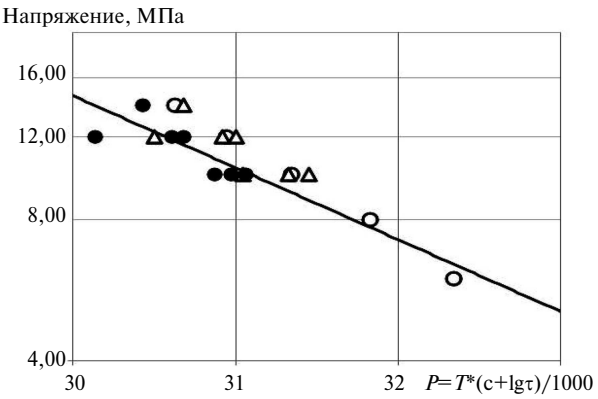


Рис. 11. Параметрическая диаграмма длительной прочности сплавов: Х28Н48В5 (прямая линия) [16] и 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии (○) и после предварительной выдержки при 1150°С различной длительности с последующим охлаждением в воде (△) или с печью (●)

охлаждение» и скорость охлаждения. Целесообразно также проводить предварительную кратковременную высокотемпературную термическую обработку заготовок деталей оборудования с ускоренным охлаждением их в температурном интервале 900–600 °С.

По уровню жаропрочности сплав 45Х26Н33С2Б2 не уступает таким жаропрочным высоколегированным сплавам, как Х28Н48В5, и потому перспективен для изготовления высокотемпературных установок с температурой эксплуатации 1100–1200 °С.

Исследования проводились на оборудовании Центра коллективного пользования «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орыщенко, А.С.** Жаростойкие жаропрочные сплавы [Текст] / А.С. Орыщенко.— СПб.: Наука, 2011.— 191 с.

2. **Орыщенко, А.С.** Разработка жаростойких сплавов для элементов конструкции радиантной части змеевиков высокотемпературных установок нефтесинтеза [Текст] / А.С. Орыщенко // Вопросы материаловедения.— 2006. № 1 (45).— С. 147–159.

3. **Анастасиади, Г.П.** Влияние циклов нагрев-охлаждение на длительную прочность литого жаропрочного сплава 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb [Текст] / Г.П. Анастасиади, С.Ю. Кондратьев, А.С. Орыщенко, С.Н. Петров, М.Д. Фукс // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2013. № 1 (166).— С. 113–120.

4. **Орыщенко, А.С.** Конструкционные материалы для радиантных змеевиков высокотемпературных установок нефтехимического комплекса [Текст] / А.С. Орыщенко // Металлург.— 2008. № 2.— С. 66–68.

5. **Орыщенко, А.С.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 1. Литое состояние [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д.Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 1 (142).— С. 155–163.

6. **Орыщенко, А.С.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 2. Влияние высокотемпературной выдержки [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 2-1 (147).— С. 217–228.

7. **Рудской, А.И.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 3. Механизм и кинетика фазовых превращений [Текст] / А.И. Рудской, Г.П. Анастасиади, А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, М.Д. Фукс // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 3-2 (154).— С. 143–150.

8. **Piekarski, B.** Creep-resistant austenitic cast steel [Текст] / B. Piekarski, J. Kubicki // Archives of Foundry Engineering.— 2008. Vol. 8, № 2.— P. 115–120.

9. **Buchanan, K.G.** Crystallography and Morphology of Niobium Carbide in As-Cast HP-Niobium Reformer Tubes [Текст] / K.G. Buchanan, M.V. Kral // Metallurgical and Materials Transactions A.— 2012. Vol. 43, № 6.— P. 1760–1769.

10. **Kaya, A.A.** Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing/carburizing environment: II. Carburization and carbide transformations [Текст] / A.A. Kaya // Materials Characterization.— 2002. Vol. 49, № 1.— P. 23–34.

11. **Sourmail, T.** Precipitates in creep resistant austenitic stainless steels [Текст] / T. Sourmail // Materials Science and Technology.— 2001. Vol. 17, № 1.— P. 1–14.

12. **Garbiak, M.** Precipitation kinetics in austenitic 18Cr-30Ni-Nb cast steel [Текст] / M. Garbiak, R. Chyliňska // Archives of Foundry Engineering.— 2008. Vol. 8, № 3.— P. 27–30.

13. Sigma Phase Formation and Embrittlement of Cast Iron-Chromium-Nickel (Fe-Cr-Ni) Alloys [Текст] // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering.— 2008. Vol. 7, № 2.— P. 127–145.

14. **Угорский, А.Э.** О параметрических методах температурно-временной экстраполяции предела длительной прочности [Текст] / А.Э. Угорский // Проблемы прочности.— 1986. № 1.— С. 40–43.

15. **Le May, Iain.** Developments in Parametric Methods for Handling Creep and Creep-Rupture Data [Текст] / Iain Le May // Journal of Engineering Materials and Technology.— 1979. Vol. 101, № 4.— P. 326–330.

16. Марочник стали для машиностроения [Текст].— М.: Изд-во НИИ информации по машиностроению, 1965.— 594 с.

АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович — *доктор технических наук, профессор кафедры технологии и исследований материалов СПбГПУ.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
тел. (921) 773-08-93

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — *доктор технических наук, профессор кафедры технологии и исследований материалов СПбГПУ.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
моб. тел. (921) 941-28-26
petroprom2013@yandex.ru

ОРЫЩЕНКО Алексей Сергеевич — *доктор технических наук, заведующий кафедрой функциональных материалов и технологий СПбГПУ.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
тел. (812) 335-58-52

ФУКС Михаил Дмитриевич — *аспирант СПбГПУ, инженер-технолог 2-й категории ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».*
191015, ул. Шпалерная, д. 49, Санкт-Петербург, Россия
тел. (965) 034-84-08

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 669.15

А.А. Попович, Н.Г. Разумов, А.О. Силин

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ Fe-Ni ПРИ МЕХАНОЛЕГИРОВАНИИ

A.A. Popovich, N.G. Razumov, A.O. Silin

RESEARCH PHASE FORMATION IN FE-NI SYSTEM BY MECHANICAL ALLOYING

Показано, что механоактивация железных порошков и сплавов на их основе в воздушной атмосфере приводит к их значительному окислению. Для предотвращения окисления в работе механоактивацию сплава Fe-Ni проводили в атмосфере аммиака. Было установлено, что механоактивация сплава Fe-Ni в атмосфере аммиака приводит к насыщению его азотом, а с увеличением времени механоактивации содержание γ-фазы растет.

СПЛАВ. ИНВАР. МЕХАНОЛЕГИРОВАНИЕ. СИНТЕЗ. АММИАК.

Shown that mechanical activation iron powders and their alloys in air leads to a significant oxidation. To prevent oxidation, mechanical activation of Fe-Ni alloy was conducted in atmosphere of ammonia. It was found that mechanical activation Fe-Ni alloy in atmosphere ammonia leads to saturation with nitrogen, increasing mechanical activation time content γ-phase increases.

AMMONIA, INVAR, MECHANICALL ALLOYING, SYNTESIS, AMMONIA

Большинство элементов периодической системы Менделеева может быть введено в расплав для придания сплавам новых свойств. Такие элементы называют легирующими. Легирующие элементы—это элементы, специально вводимые в сталь для получения заданных характеристик кристаллизации, структуры, физико-химических, механических и специальных свойств (жаростойкость, жаропрочность, износо-, хладо-, коррозионностойкость и др.).

По воздействию на критические точки A_3 и A_4 диаграммы состояния сплава Fe–Ni легирующие элементы подразделяются на аустенитообразующие и ферритообразующие элементы. Под влиянием данных элементов изменяются критические точки и линии фазовых диаграмм состояния.

К аустенитообразующим элементам относятся Ni, Mn, C, N и др. Из всех классических легирующих аустенитообразующих элементов Ni — самый широко распространенный.

Согласно равновесной диаграмме состояния (рис. 1, *а*) с увеличением содержания количества Ni образуются следующие области: α-область (до 20 % Ni), (α + γ)-область (от 20 до 30 %) и γ-область (более 30 % Ni).

Анализ литературных данных показал, что механолегированные сплавы системы Fe–Ni имеют аналогичные закономерности образования данных фаз. Однако при механолегировании сужается область существования (α + γ). Так, согласно работам [1, 2] при содержании 22 % Ni в системе Fe–Ni после отжига имеется полностью γ-структура. Автор работы [2] связывает данный эффект (расширение области существования γ-фазы) с понижением температуры мартенситного превращения. Действительно, Ni оказывает значительное влияние на точки начала образования аустенита $A_н$ и мартенсита $M_н$ (рис. 1, *б*). В таблице приведены соответствующие им температуры. Однако этот эффект не является основанием для утверждения, что при механолегировании область существования γ-фазы смещается влево. Детальный анализ работ [2–4] по системе Fe–Ni показал, что их авторы не учитывали влияние атмосферы механоактивации. В частности, авторы упомянутых работ проводили механолегирование в атмосфере воздуха.

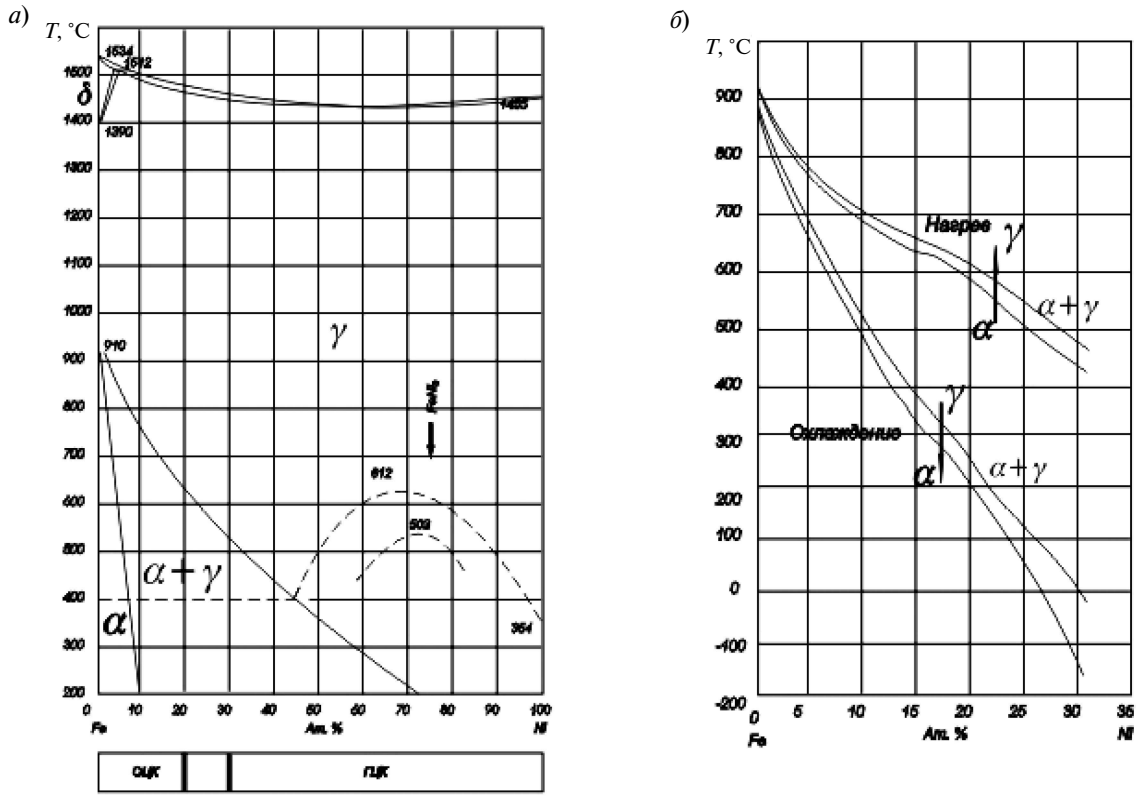


Рис. 1. Равновесная (*а*) и неравновесная (*б*) диаграммы состояния Fe–Ni [5]

Известно, что механоактивация железных порошков и сплавов на их основе в воздушной атмосфере приводит к их значительному окислению. По данным работы [3] механоактивация железных порошков в воздушной атмосфере приводит к растворению в кристаллической решетке последнего до 2 ат. % O_2, а на границах зерен может достигать до 20 ат. % O_2. Естественно, что отжиг таких порошков при 700 °С приводит к окислению железного порошка и, как следствие этого, к нарушению баланса между содержанием железа и никеля (в сторону увеличения содержания Ni). После отжига при 700 °С фазовый состав состоит из α, γ и оксидов железа. Исходя из изложенного с целью проверки выдвинутой нами гипотезы мы провели исследования по влиянию атмосферы механоактивации на фазовый состав сплавов системы Fe-Ni. Поскольку азот — сильный аустенитообразующий элемент, к тому же экологически чистый и недорогой, то представляет интерес исследовать влияния азота на фазообразование в системе Fe–Ni–N.

Таблица 1

Температуры начала образования мартенсита ($M_н$) и аустенита ($A_н$) [5]

Ni, ат. %	Температура, °С	
	$M_н$	$A_н$
9,5	525	680
14,5	350	625
19,0	210	570
23,75	120	510
28	7	425
29,3	–30	390
29,7	–42	365
30,7	–72	335
31,7	–115	315
32,4	–146	300
32,7	–180	300
33,0	–223	300

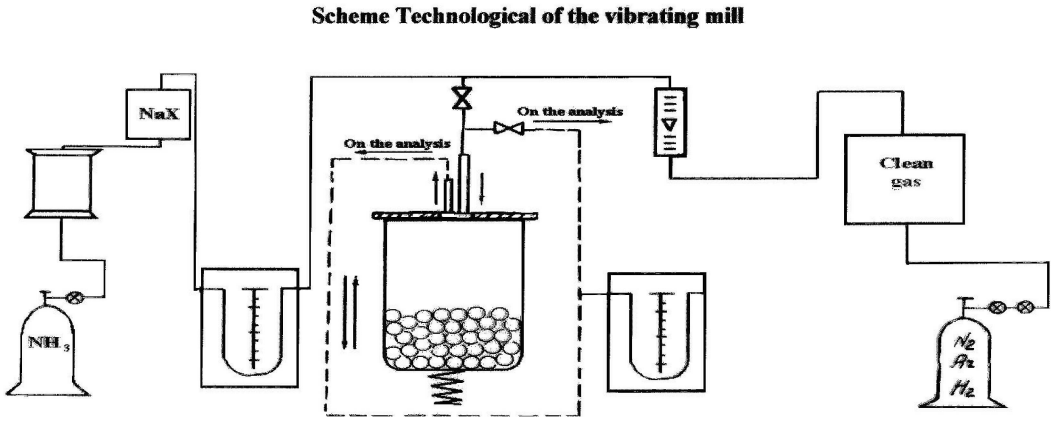


Рис. 2. Экспериментальная схема установки

Целью данной работы было исследование влияния атмосферы аммиака и времени механоактивации на фазовый состав сплавов системы Fe–Ni.

Механическую активацию исследуемых порошков проводили в герметичном механореакторе высокоэнергонапряженной вибромельницы в среде аммиака по методике, описанной в работе [6]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. В качестве исходных компонентов использовали порошки железа (ПЖ-2М) и электролитический никель. Размалывающей фазой в вибромельнице служили стальные шары. При подборе размалывающих шаров исходили из следующих принципов: диаметр шаров должен быть примерно одинаковым и не приводящим к их заклиниванию. Для получения необходимых соединений брали расчетные навески исходных веществ. Смесь компонентов и шаров засыпали в механореактор, после чего тот плотно закрывался. Отношение массы загружаемого порошка к массе шаров составляло от 1:10 до 1:25. Время размола — от 1 до 20 часов. Чтобы избежать окисления полученного порошка сразу после синтеза реактор оставляли закрытым в течение суток.

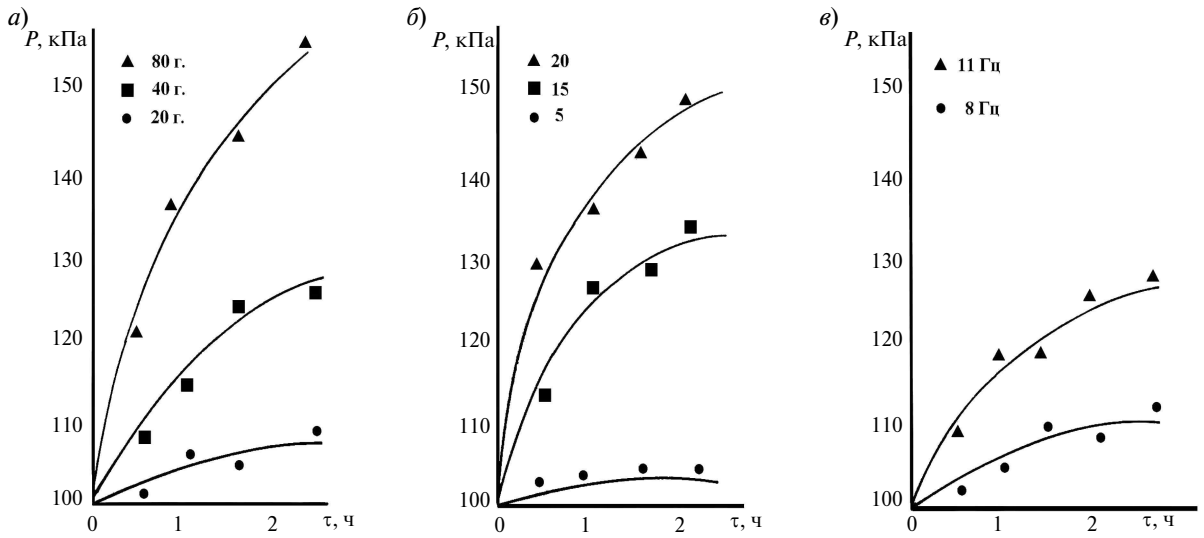


Рис. 3. Влияние на давление в зоне механореактора различных технологических параметров процесса, в том числе: *а*) массы железного порошка (при частоте 11 Гц и интенсивности 10); *б*) интенсивности загрузки (при частоте 11 Гц и весе железного порошка 40 г); *в*) частоты колебаний механореактора при интенсивности 10 и весе железного порошка 40 г

Известно, что аммиак диссоциирует только в присутствии катализатора, в частности железа. Поскольку механоактивация железного порошка приводит к активации его (порошка) поверхности, то следовало ожидать диссоциацию аммиака при механоактивации железного порошка согласно уравнению

$$NH_3 \leftrightarrow 1/2\ N_2 + 3/2\ H_2,$$

из которого следует, что из одного объема аммиака получают два объема N_2 и H_2. Следовательно, косвенным подтверждением диссоциации аммиака должен служить рост давления в механореакторе.

Исходя из изложенного мы провели эксперименты по влиянию частоты, интенсивности загрузки и массы навески на давление (рис. 3).

Как видно из рис. 3, во всех случаях наблюдается рост давления в зоне механореактора. Особенно интенсивно давление возрастает в зависимости от частоты колебания механореактора.

На рис. 4 показано влияние времени механоактивации на содержание азота в сплавах Fe–Ni. Видно, что с увеличением времени механоактивации содержание азота растет и при 20 часах размола достигает 0,5 % N.

Таким образом, нами установлено, что механоактивация сплава Fe–Ni в атмосфере аммиака приводит к насыщению его азотом.

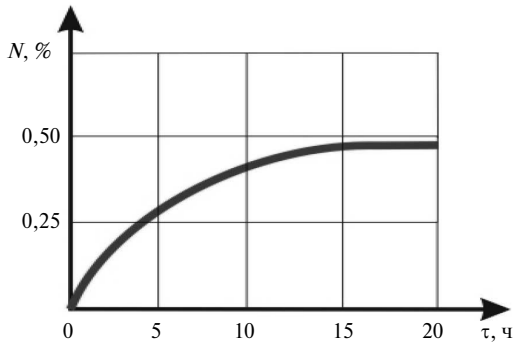


Рис. 4. Влияние времени механоактивации на содержание азота в сплавах Fe-Ni

Следующий этап исследований состоял в изучении влияния времени механоактивации на фазовый состав исследуемых сплавов, результаты отражены на рис. 4.

Фазовый состав образцов определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE (Германия) в CuKa-излучении по стандартной методике ($U = 40$ кВ, $I = 40$ мА). Из рис. 4 следует, что с увеличением времени механоактивации содержание γ-фазы растет, при этом ее доля в сплаве после 3,5 часов механоактивации достигает 90 %.

Таким образом, что механоактивация железных порошков и сплавов на их основе в воздушной

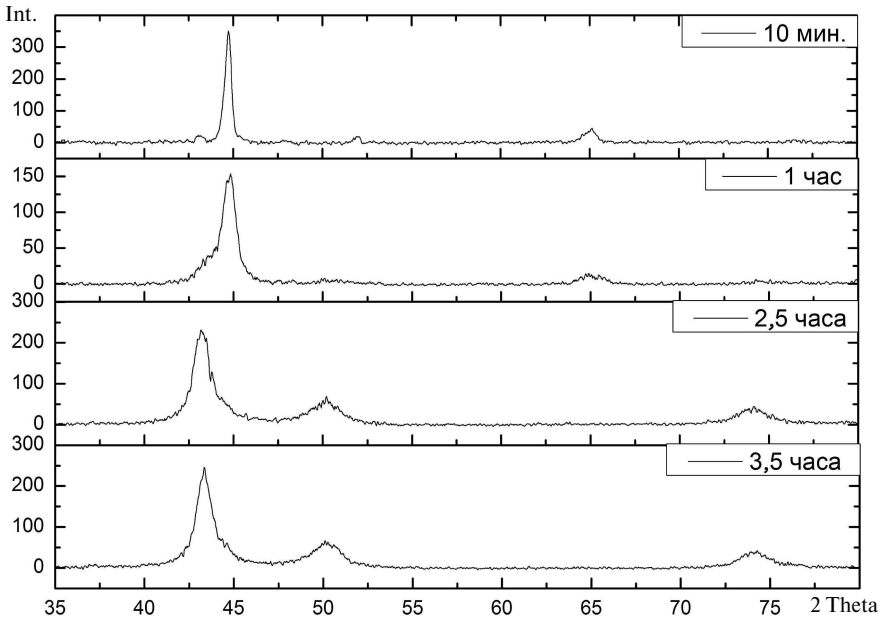


Рис. 5. Влияние времени механоактивации на содержание ГЦК-фазы

атмосфере приводит к их значительному окислению. Это связано с тем, что при механоактивации железных порошков в воздушной атмосфере происходит растворение в кристаллической решетке последнего до 2 ат. % O_2, а на границах зерен —до 20 ат. % O_2. Для предотвращения окисления в работе проводили механоактивацию сплава Fe–Ni в атмосфере аммиака, и было установлено, что это приводит к насыщению сплава азотом, а с увеличением времени механоактивации растет содержание γ-фазы.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактам № 14.B37.21.0443 на выполнение научно-исследовательских работ для государственных нужд в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чердынцев, В.В.** Фазообразование в системах Fe-Mn, Fe-Ni, Fe-Co, Fe-Cu, Cu-Cr при механическом сплавлении [Текст]; автореферат дисс. ... канд. физ.-мат. наук / В.В. Чердынцев.— М., 2000.— 22 с

2. **Вол, А.Е.** Строение и свойства двойных металлических систем [Текст] / А.Е. Вол.— М.: Наука, 1962.— Т. 2.

3. **Балдохин, Ю.В.** «Методы мессбауэровской спектроскопии [Текст] / Ю.В. Балдохин, В.В. Чердынцев, С.Д. Калошкин // Известия Академии наук.— 2001. Т. 65, № 7.— С. 1081–1088.

4. Mechanical Alloying [Текст] // Mechanical Alloying. Material Science Forum Kyoto, Japan 1990 / Trans. Tech. Publication c/o Ash-gate Publishing Company.— Old Post Road. Brookfield. VT 0536 USA.— 1992. P. 445–452.

5. **Калошкин, С.Д.** Мессбауэровкая спектроскопия [Текст] / С.Д. Калошкин.— М., 2000.

6. **Попович, А.А.** Механохимический синтез тугоплавких соединений [Текст] / А.А. Попович.— Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003.

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич — *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и исследования материалов, исполнительный директор ОНТИ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия.
(812) 552-98-29
popovicha@mail.ru

РАЗУМОВ Николай Геннадьевич — *аспирант кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
n.razumov@inbox.ru

СИЛИН Алексей Олегович — *ведущий инженер кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия;
(812) 552-98-29

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 669.1

О.Г. Климова, Г.А. Туричин, В.А. Лопота,
А.И. Шамшурин, И.А. Сизова.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

O.G. Klimova, G.A. Turichin, V.A. Lopota,
A.I. Shamshurin, I.A. Sizova

STRUCTURE FEATURES OF THE METAL WELDED BY ELECTRON BEAM WELDING OF DISSIMILAR MATERIALS

Описаны результаты исследования структуры соединений разнородных материалов, полученных с помощью электронно-лучевой сварки. Оценка тепловой ситуации в зоне сварки проведена с использованием математического моделирования. С помощью современных металлографических методов и сканирующей электронной микроскопии исследован химический и структурный состав металла шва и околошовной зоны при сварке сталей со сплавами на основе меди и алюминия. Установлены основные закономерности формирования микроструктуры металла в зоне сварного соединения, проанализировано распределение различных компонентов по сварному соединению.

СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЭЛЕКТРОННО ЛУЧЕВАЯ СВАРКА. СТАЛЬ. МЕДЬ. АЛЮМИНИЙ.

Work describes research results of a structure, joining dissimilar materials, obtained with electron-beam welding. Temperature quality of the welding area was evaluated with mathematical simulation. Aluminum and copper steels were welded together. Weld and near-weld area chemical and structural compositions were observed with modern metallographic methods and scanning electron microscopy technic. Main patterns of metall microstructure formation in weld zone were established. Chemical component distribution in a weld area was analyzed.

WELDING OF DISSIMILAR MATERIALS. ELECTRON BEAM WELDING. STEEL. COPPER. ALUMINUM.

Современное машиностроение остро нуждается в получении качественных сварных соединений разнородных материалов, в частности соединений стали со сплавами на основе меди или алюминия. Подобные задачи особенно актуальны в автомобильной и авиационной промышленности (сварка корпусных конструкций, сварка трубопроводов). Использование в конструкциях разнородных материалов позволяет решить различные конструктивно-технологические задачи, в том числе повысить ресурс, износостойкость и сопротивляемость агрессивным средам.

Задача сварки сталей с алюминиевыми и медными сплавами технологически достаточно сложна. Это связано с металлургическими особенностями формирования швов таких соединений при сварке плавлением. Многие сочетания разнородных металлов (медь — алюминий, алюминий — сталь, алюминий — титан, титан — сталь, железо — ниобий и др.) имеют ограниченную взаимную растворимость. Традиционно считается, что возникающие при кристаллизации таких швов интерметаллиды приводят к охрупчиванию [1]. Для пары алюминий — сталь известны несколько методов сварки, таких, как аргонодуговая сварка неплавящимся электродом [2], диффузионная сварка [3], сварка давлением [4], сварка с использованием промежуточного металла [5]. Однако ни один из перечисленных методов, а также использование сочетания разных видов сварки не исключают появления прослоек интерметаллидов. А успешно используемая сварка взрывом позволяет сваривать только листовые материалы.

Дополнительные трудности возникают при большой разнице в теплофизических свойствах, как, например, при сварке медных сплавов со сталью. Такие виды сварки, как лазерная (ЛС) и электронно-лучевая (ЭЛС), за счет значительно более точного управления параметрами теплового источника в зоне сварки обладают очевидным преимуществом для сварки разнородных материалов. Использование высокотехнологичной сварки электронным лучом алюминиевых сплавов позволяет избежать образования оксидной пленки Al_2O_3, которая является частым дефектом при сварке плавлением [6]. Главная особенность применения лучевых технологий в сварке — высокие скорости. Это может позволить избежать образования прослойки интерметаллидов и образования обширной области зоны термического влияния (ЗТВ) в материалах с высокой теплопроводностью.

Методика и материалы

В работе приведено исследование структуры швов стыкового соединения без скоса кромок, полученных при электронно-лучевой сварке на установке ProBeam K7 Universal Electron Beam Chamber в вакууме. Параметры режимов, при которых были получены образцы, представлены в табл. 1.

Химический состав исследуемых материалов приведен в табл. 2.

В работе представлены результаты экспериментального исследования сварных соединений бронза — сталь и алюминий — сталь, полученных с использованием ЭЛС. Изучена микроструктура полученных сварных соединений с целью определения возможности использования ЭЛС для получения удовлетворительных сварных соединений разнородных материалов. Для анализа особенностей формирования структуры сварных соединений при сварке разнородных материалов необходимо знание поля температур и скоростей охлаждения в зоне сварного шва. Для определения этих величин нами была использована система моделирования LaserCAD [7], позволяющая рассчитывать поле температур и термические циклы любой точки сварного шва и зоны термического влияния. Поскольку математические модели процессов, используемые в LaserCAD, не позволяют учитывать разнородность соединения, они были доработаны для учета особенностей такого соединения. В частности, в модель рассеяния была добавлена возможность учета химического состава парового факела, который при сварке разнородных веществ состоит из нескольких компонентов. Решение задачи о тепломассопереносе в расплаве

Таблица 1

Параметры режима эксперимента

Свариваемые материалы	U, кВ	I, мА	$V_{св}$, мм/с	P, Вт	$Q_{пог}$, Дж/мм
Сталь — бронза	120	11	45	1320	29,33
Сталь — алюминий	120	10	50	1200	24

Таблица 2

Химический состав сваренных материалов

Материал	Содержание элементов, масс. %, в сваренном шве														
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ti	Zn	Ni	Mg	Al	Cu	Sn	Fe
Сталь	0,02	0,01	0,23	0,01	0,005	0,01	0,005	0,001	0,004	0,0126	–	0,031	0,01	0,002	99,9
Бронза	–	–	–	0,06	0,004	–	–	–	0,05	0,015	–	–	94,5	5,37	0,014
Сплав Al	–	0,4	0,7	–	–	0,13	–	0,15	0,2	–	4,5	95,2	0,1	–	0,4

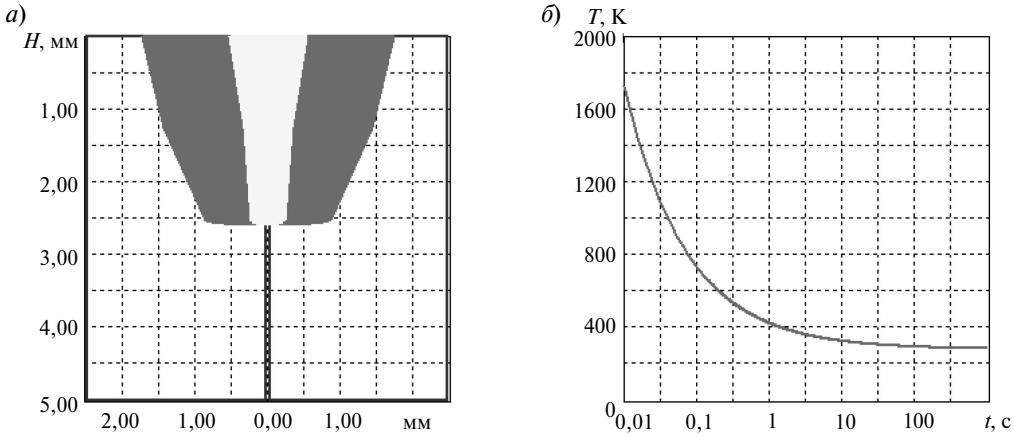


Рис. 1. Результаты моделирования формы проплавления (*а*) и скорости охлаждения (*б*) при сварке стали с алюминиевым сплавом

также было изменено для учета влияния смешения свариваемых материалов на теплофизические свойства расплава. Пример расчетов формы проплавления и скорости охлаждения на границе сталь — алюминий показаны на рис. 1.

Скорость сварки — 3 см/сек, ускоряющее напряжение — 100 кВ, ток луча — 11 мА, радиус сканирования луча — 0,5 мм, линия движения луча смещена в сторону Al на 0,5 мм. Результаты моделирования показывают, что даже при смещении оси движения луча в сторону более легкоплавкого материала наблюдается частичное подплавление более тугоплавкого материала (сталь). Соответственно, это свидетельствует о возможном формировании сварного шва при сварке выбранных разнородных материалов электронным лучом.

Металлографические исследования сварных соединений были проведены на микроскопе DMI5000 (Leica) с программным обеспечением Tixomet. Для определения микроструктуры использовано поочередное травление: сначала вытравливали стальную составляющую, затем цветной сплав. Для травления стали использовали раствор азотной кислоты в спирте, для бронзы — раствор хлорного железа, для алюминиевого сплава — раствор плавиковой кислоты.

Исследования химического состава и распределения химических элементов в сварном шве были выполнены на сканирующем электронном микроскопе SUPRA 55VP (Carl Zeiss) с использованием приставки Oxford INCA Wave 500. Определение микротвердости проводилось на микротвердомере MicroMet 5103.

Анализ структуры сварного соединения сталь — алюминий

Согласно диаграмме Al–Fe[8] в структуре шва можно обнаружить несколько интерметаллидов — $AlFe_3$, AlFe, Fe_2Al_5, $FeAl_3$ [9]. На рис. 2 представлен сварной шов «алюминий — сталь».

При травлении стали в верхней области шва присутствует область ЗТВ шириной 50–100 мкм; структура ЗТВ стали — бейнитная (рис. 2, *в*). Затем присутствует область со стальной литой структурой. При переходе к алюминию обнаруживается область фазы (рис. 2, *г*), отличной от исходных свариваемых материалов. При травлении алюминия также обнаруживается область, которая не была определена и при травлении стали (рис. 2, *а*). Структуру каплеподобной области не удалось вытравить. Вероятней всего, в процессе ЭЛС произошло оплавление стали, что обусловило протекание взаимной диффузии компонентов.

Для установления качества сплавления между железом и алюминием был исследовано распределение элементов в области капли (рис. 3). Количественное содержание, %, элементов в исследуемой области спектров, продемонстрированных на рис. 4, следующее:

Номер спектра	Al	Fe
1	3,01	96,99
2	10,13	89,87
3	7,24	92,76
4	27,60	72,40
5	9,35	90,65
6	99,31	0,69
7	55,07	44,93

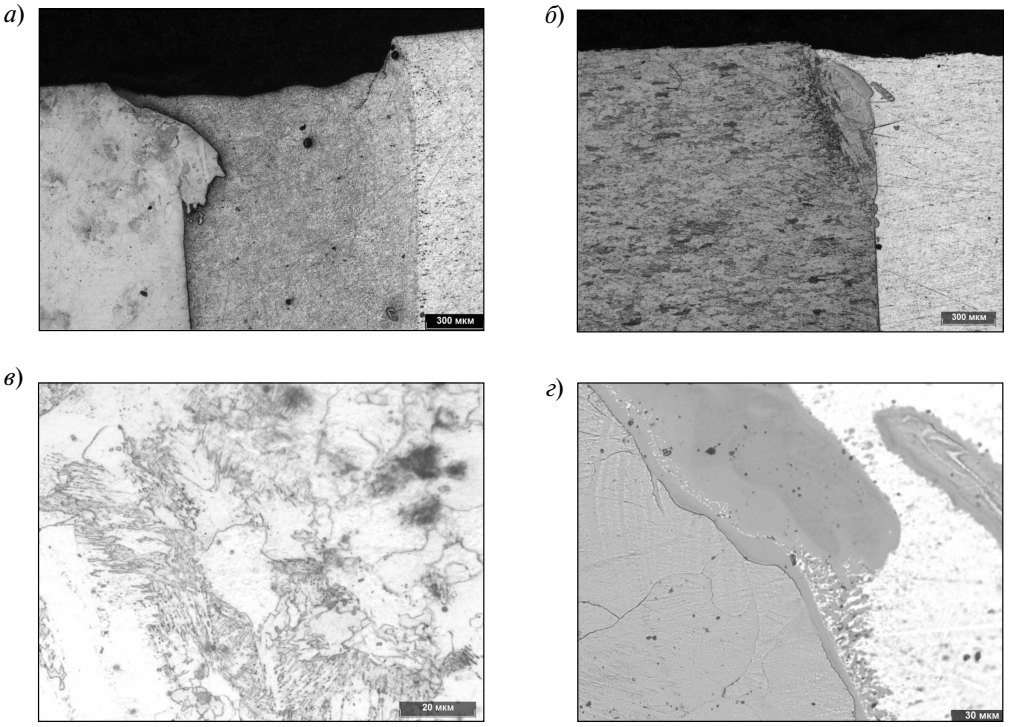


Рис. 2. Сварное соединение Al–Fe при травлении алюминия (*а*) и стали (*б*, *в*, *г*)

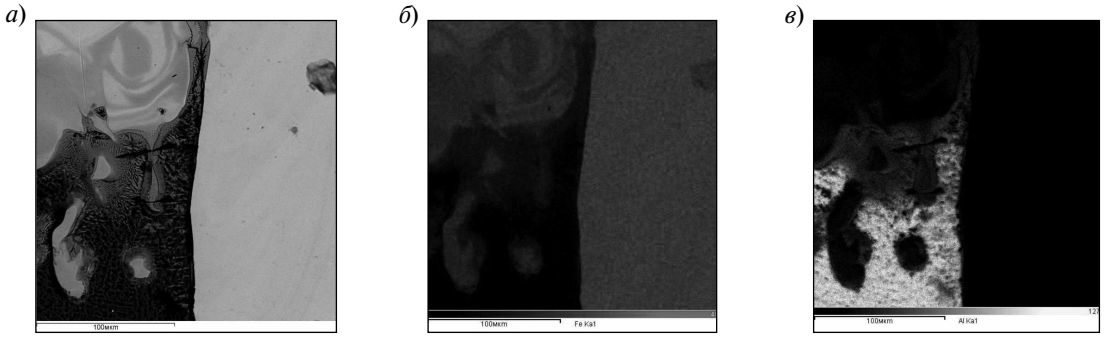


Рис. 3. Фотография капли (*а*), рапределение железа (*б*) и алюминия (*в*)

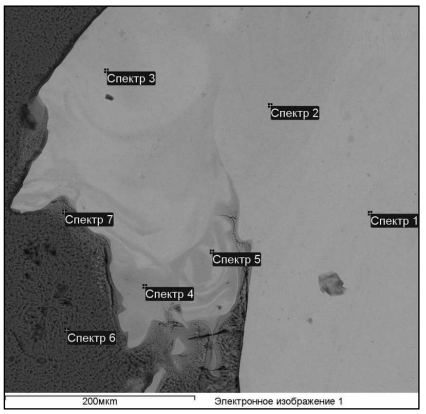


Рис. 4. Расположение спектров (точки 1–7) в области капли

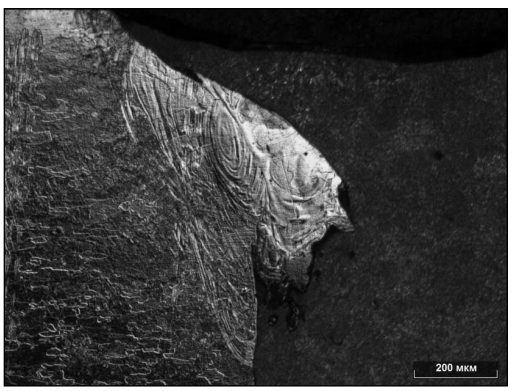


Рис. 5. Структура перемешивания («косое поле»)

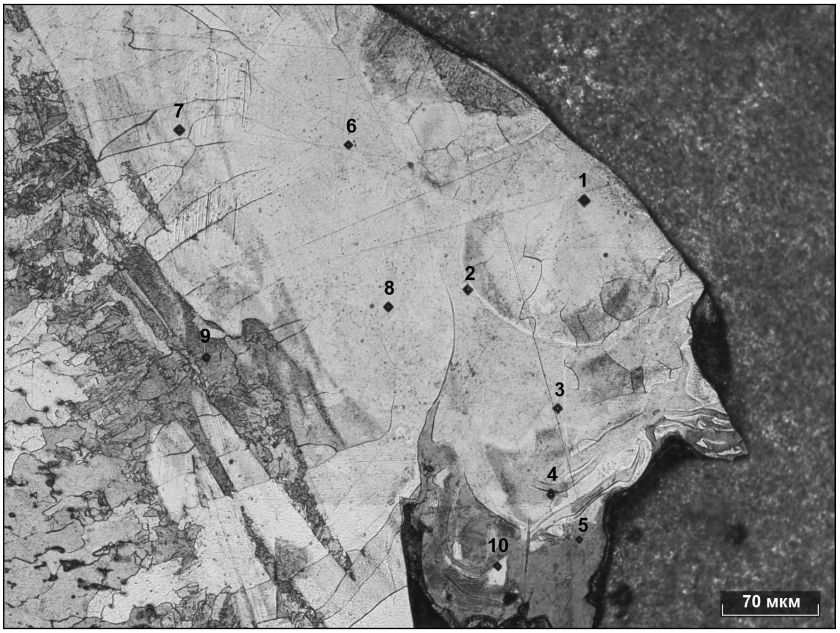


Рис. 6. Расположение в каплеподобной области участков (точки 1–10), где измерялась микротвердость

Результаты распределения железа и алюминия показывают, что перемешивание неравномерное; слоистой структуры не обнаруживается. О характере перемешивания и наличии областей с различным соотношением алюминия и железа свидетельствуют также микрофотография, сделанная в косом свете (рис. 5).

При подобном неравномерном перемешивании возможно образование интерметаллидов. Для косвенного определения наличия интерметаллидов в области перемешивания необходимо изучение твердости в различных участках каплеподобной области (рис. 6). Результаты измерений микротвердости на участках 1–10 следующие:

Номер участка	$HV_{0,01}$
1	154,3
2	162,6
3	178
4	190,5
5	261,1
6	215
7	147,2
8	172,9
9	143,3
10	206,1

Для возможности обнаружения интерметаллидной прослойки в средней и нижней зоне шва (рис. 7) был проведен поэлементный химический анализ. Он дал следующие результаты по содержанию Al и Fe, %:

Номер спектра	Al	Fe
1	97,94	2,06
2	94,00	6,00
3	1,10	98,90
4	0,58	99,42

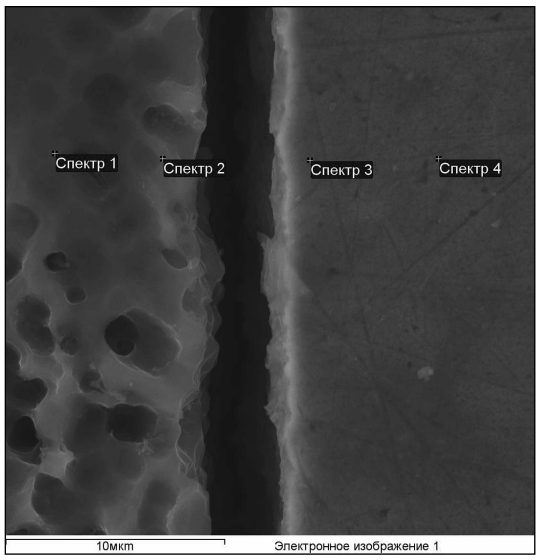


Рис. 7. Расположение спектров (точки 1–4) в нижней и средней зонах шва, где анализировался элементный состав

Согласно проведенному химическому анализу наличие интерметаллидных прослоек маловероятно. Однако механические испытания на подобных образцах показывают низкие значения предела прочности, что, вероятнее всего, связано с отлипанием во время сварки. Таким образом, в случае электронно-лучевой сварки стали и алюминиевого сплава требуется принятие новых технологических решений.

Анализ микроструктуры сварного соединения сталь — бронза

Согласно диаграмме бинарной системы Cu–Fe [8] в структуре сварного шва будет существовать смесь двух твердых растворов на основе меди и железа [10]. На рис. 8 представлена микроструктура шва, полученного по использованным режимам (см. табл. 1).

В верхней зоне шва обнаруживается область перемешивания. От средней зоны шва до его корня происходило оплавление стали за счет эффекта Ребиндера [11]: проникновение медного сплава по границам зерен и микротрещинам вызвало оплавление стальных зерен в области ЗТВ. В зоне термического влияния (ее ширина составляет 170–190 мкм) сталь состоит из бейнитных зерен, при этом на всей протяженности ЗТВ присутствуют медные вкрапления; допустимая глубина затекания при стандартных методах сварки составляет 0,3–0,5 мм [10].

Для более наглядного представления степени перемешивания железа и меди было детально изучено распределение элементов в области сплавления стали и бронзы (рис. 9, *а*, *б*, *в*), а также определен химический состав в точках 1–5 (рис. 10). средней зоны шва. Результаты представлены в табл. 3.

В данной области можно наблюдать и линию сплавления, и непосредственное перемешивание обоих компонентов в жидком состоянии.

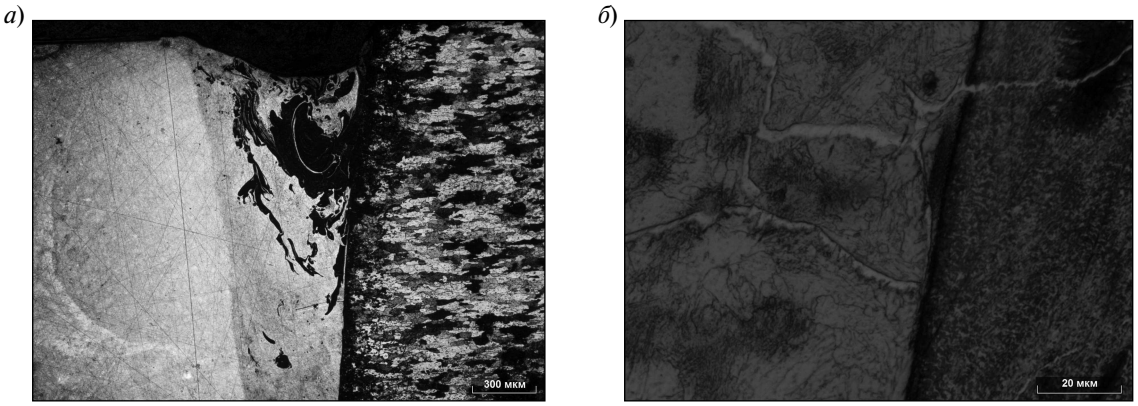


Рис. 8. Сварное соединение Cu–Fe при травлении бронзы (*а*) и линия сплавления в средней зоне шва (*б*)

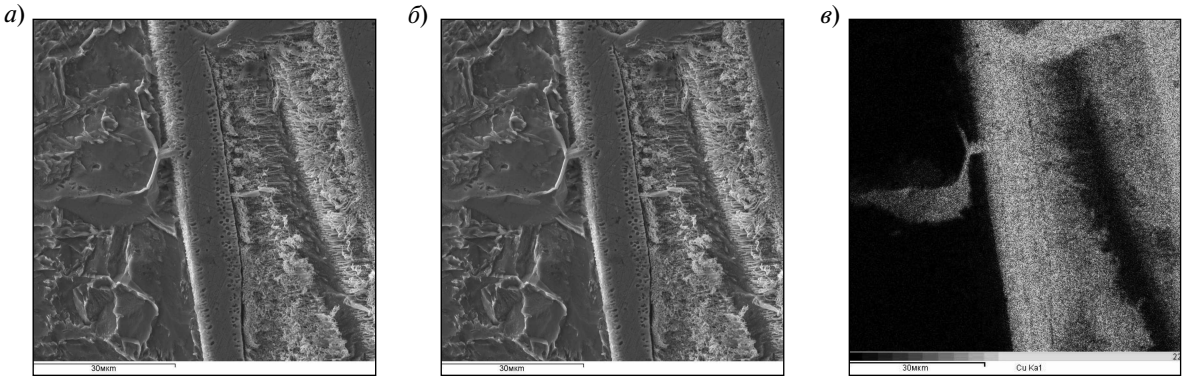


Рис. 9. Фотография линии сплавления (*а*) и распределение Cu (*б*) и Fe (*в*) в области линии сплавления

Исследование распределения элементов наглядно показывает образование микротрещин в области ЗТВ стали из-за перегрева и затекание более легкоплавкой медной составляющей с оплавлением стальных зерен. Медь была обнаружена также в микропорах ЗТВ. Анализ измерений микротвердости не показал скачков твердости в области перемешивания меди и железа (240–250 $HV_{0,01}$).

Обсуждение результатов

При сварке алюминия со сталью между ними практически всегда образуется четко выраженная прослойка, толщина которой составляет 10–40 мкм в зависимости от режима сварки. В работе [5] отмечено, что согласно рентгенофазовому анализу при лазерной сварке с использованием давления образуются наиболее хрупкие интерметаллиды $FeAl_3$ и Fe_2Al_5; при использовании рентгенофазового анализа для нашего образца было обнаружено наличие только двух фаз — железа и алюминия. Твердость указанных интерметаллидов составляет более 1000 HV. В нашем случае размер отпечатков составлял не более 5 мкм; результаты измерения микротвердости показали отсутствие интерметаллидных прослоек; максимальная твердость составила 261,1 *HV*. На твердость в области шва также оказывает влияние наличие бейнитных зерен. Однако даже при отсутствии интерметаллидов в области сварного соединения значения предела прочности при испытаниях на растяжение — низкие, что, вероятно, связано с отлипанием металла во время сварки. Подобная проблема требует принятия новых технологических решений при использовании ЭЛС для сварки сталей и алюминиевых сплавов.

В результате ЭЛС бронзы и стали в верхней зоне шва образуется область гидродинамического перемешивания глубиной 0,6–0,8 мм. В средней зоне шва и ниже происходит оплавление медного сплава и частичное оплавление стали за счет протекания меди в микротрещины и по границам зерен, что действует, как залечивание дефектов, возникших при сварке. При измерении твердости резкого изменения значений не установлено. Глубина затекания бронзы не превышает допустимые 0,3–0,5 мм. Проведенные исследования показывают удовлетворительное качество шва бронза — сталь.

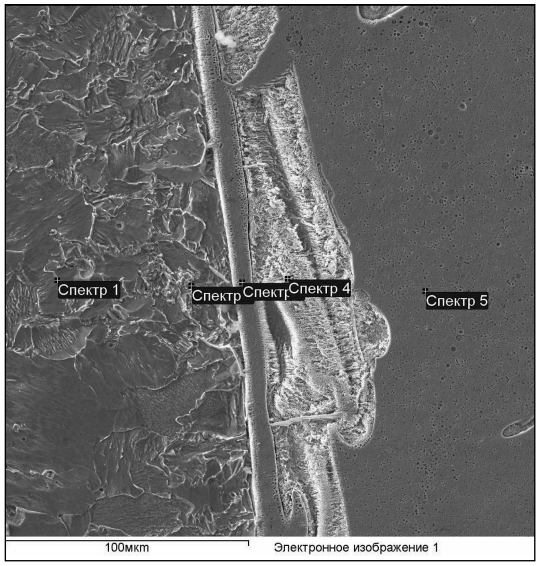


Рис. 10. Расположение точек (спектров) в области сплавления стали и бронзы

Исследования привели к следующим выводам:

При сварке алюминиевого сплава со сталью наблюдается перемешивание алюминия и железа в приповерхностной области шва. При исследовании микротвердости в различных участках каплеподобной области не обнаружена твердость, превышающая 261,1 $HV_{0,01}$. В данном случае невозможно говорить об образовании непрерывных интерметаллидных прослоек, отличающихся хрупкостью. Наличие интерметаллидов также не обнаружено в области средней зоны сварного шва. Для повышения механических характеристик сварочного соединения требуется предложить новые технологические решения для ЭЛС разнородных материалов.

Таблица 3

Химический состав, %, сварного соединения в области линии сплавления

Номер спектра (точки)	Mn	Fe	Cu	Sn
1	0,27	99,73	0,00	0,00
2	0,23	99,04	0,73	0,00
3	0,22	21,05	74,78	3,95
4	0,00	2,98	91,60	5,42
5	0,00	4,27	90,61	5,12

Микроструктура сварного соединения бронза — сталь представляет собой двухфазную смесь железа и меди; отчетливо просматривается наличие гидродинамического вихря в верхней области шва. Твердость шва не превышает 250 $HV_{0,01}$. Наблюдается затекание бронзы по границам зерен стали и по микротрещинам на допустимую глубину до 0,2 мм, что действует как залечивание дефектов в области шва.

Настоящая работа выполнена в рамках гранта РФФИ по программе МОЛ_а 2012, № 12–08–31376 (тема: «Особенности фазовых и структурных превращений при лазерной сварке разнородных материалов»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каракозов, Э.С.** Холодная сварка труб [Текст] / Э.С. Каракозов, В.Д. Сапрыгин.— М., Металлургия, 1978.— 176 с.

2. **Rattana, B.** Feasibility of Using TIG Welding in Dissimilar Metals between Steel/Aluminum Alloy [Текст] / B. Rattana, M. Pusit, R. Sirirat, M.Yoshiharu // Ener. Res. J.— 2010. Vol. 1, № 2.— P. 82–86.

3. **Wang, J.** Fine structure at the diffusion welded interface of Fe_3Al/Q235 dissimilar materials [Текст] / J. Wang, Y. Li, H. Wu // Bull. Mater. Sci.— 2001. Vol. 24, № 6.— P. 639–642.

4. **Shubhavardhan, R.N.** Friction Welding to Join Dissimilar Metals [Текст] / R.N. Shubhavardhan, S. Surendran // Int. J. of Emer. Tech. and Adv. Eng.— 2012. Vol. 2, Iss. 7, P. 200–210.

5. **Saidaa, K.** Fluxless laser brazing of aluminium alloy to galvanized steel using atandem beam — dissimilar laser brazing of aluminium alloy and steels [Текст] / K. Saidaa, H. Ohnishia, K. Nishimoto, // Weld. Int.l.— Vol. 24, № 3, P. 161–168.

6. **Рябов, В.Р.** Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами [Текст] / В.Р. Рябов.— Киев: Наукова думка, 1983.— 264 с.

7. **Туричин, Г.А.** Компьютерный анализ процессов лучевой обработки материалов: система моделирования LaserCAD [Текст] / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева // Фотоника.— 2008. № 6.— С. 18–20.

8. **Банных, О.А.** Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа [Текст] / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова [и др.]. М.: Металлургия, 1986.— 440 с.

9. **Klages, K.** Laser Beam Micro Welding Dissimilar Metals [Текст] / K. Klages, C. Ruettimann, A.M. Olowinsky. // Proc of ICALEO 2003 of Laser Institute.— America, Jacksonville, 2003.

10. **Рябов, В.Р.** Сварка разнородных материалов [Текст] / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин.— М.: Машиностроение, 1984.— 239 с.

11. **Грачев, С.В.** Физическое металловедение [Текст]: учеб. для вузов / С.В. Грачев, В.Р. Бараз, А.А. Богатов, В.П. Швейкин.— Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. техн. ун-та, 2001.— 534 с.

КЛИМОВА Ольга Геннадьевна — *кандидат технических наук, инженер 1-й категории кафедры технологии и исследования материалов института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27
paniolia@list.ru

ТУРИЧИН Глеб Андреевич — *доктор технических наук, профессор кафедры сварки и лазерных технологий института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27

ЛОПОТА Виталий Александрович — *профессор, заведующий кафедрой сварки и лазерных технологий института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, член-корреспондент РАН.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27

ШАМШУРИН Алексей Игоревич — *младший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27

СИЗОВА Ирина Александровна – *студентка 5 курса кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 620.193

В.П. Юркинский, Е.Г. Фирсова, В.В. Оковитый

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОКСИДИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ 20 И 12Х18Н10Т НА ПОРИСТОСТЬ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

V.P. Yurkinsky, E.G. Firsova, V.V. Okovity

THE EFFECT OF CARBON STEEL (TYPES STEEL C1020) AND STAINLESS STEEL (TYPES STEEL 321) OXIDATION TECHNIQUE ON THE POROSITY OF OXIDE COATINGS

Изучено оксидирование углеродистой стали 20 и легированной нержавеющей стали 12Х18Н10Т с использованием термического, химического и анодного способов оксидирования. Определена пористость полученных оксидных покрытий.

ОКСИДИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ. ХИМИЧЕСКОЕ. АНОДНОЕ. ОКСИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ. ПОРИСТОСТЬ.

The oxidation of carbon steel types C1020 and stainless steel types 321 by thermal, chemical and anodic techniques is studied, and the porosity of the obtained oxide coatings is determined.

THERMAL. CHEMICAL. ANODIC OXIDATION. OXIDE COATINGS. POROSITY.

Малоуглеродистые и легированные стали находят применение в качестве материала для теплообменников в ряде ядерных устройств. Коррозионная стойкость оксидного покрытия существенно зависит от его пористости [1–3]. Поэтому представляет практический интерес определить влияние на пористость оксида способа его получения.

В предлагаемой вниманию работе изучена пористость оксидных покрытий углеродистой стали 20 и высоколегированной стали 12Х18Н10Т в зависимости от способа их оксидирования, при этом использованы методы термического, химического и анодного оксидирования.

Экспериментальная часть

Образцы стальной жести (2×3×0,5 см) предварительно механически полировались, тщательно отмывались в мыльной воде и далее выдерживались 1–2 минуты в растворе серной кислоты (5 масс.%). После этого образцы промывались в дистиллированной воде и сушились при 80 °С.

Термическое оксидирование образцов стали 20 проводилось на воздухе в печи сопротивления при 350 °С , а стали 12Х18Н10Т — при 350 и 700 °С, причем выдержка при каждой температуре производилась в течение 30, 60 и 90 мин. для стали 20 и 60, 90 минут — для стали 12Х18Н10Т.

Химическое оксидирование проводилось в трех различных средах следующих составов:

1) едкий натр — 650 г/л, азотнокислый натрий — 175 г/л. Температура раствора — 135 °С; время обработки — 60, 90 и 120 мин.;

2) едкий натр — 750 г/л, азотнокислый натрий — 225 г/л, нитрит натрия — 60 г/л; температура раствора — 140 °С; время обработки 60, 90 и 120 мин;

3) расплав гидроксида натрия; температура — 350 °С; время обработки 10, 15 и 30 мин.

Для анодного оксидирования использовался водный раствор NaOH с концентрацией 40 масс.% при температуре 100 °С. В качестве катода использовался графитовый электрод. Анодное оксидирование выполнялось при двух различных плотностях тока — 30 и 60 мА/см^2. Время оксидирования составляло 60 и 120 мин.

Пористость оксидных покрытий определялась путем наложения на исследуемый образец фильтровальной бумаги, смоченной раствором, содержащим железосинеродистый калий (10 г/л) и хлорид натрия (20 г/л). Количество выявлен-

ных пор определялось визуально с помощью компьютерной программы «Photoshop». Пористость П, %, определялась отношением суммарной поверхности пор к общей наблюдаемой поверхности на фотографии изученного оксида (рис. 1).

В качестве дополнительной оценки защитных свойств оксидных покрытий на сталях была использована методика измерения стационарных электродных потенциалов оксидированных образцов, для сравнения также измерены потенциалы на неоксидированных образцах. Измерения стационарных потенциалов проводились в растворе 0,5М NaCI в течение 10 минут [4].

На рис. 1 приведены примеры фотографий оксидных покрытий, полученных различными методами.

В таблице и на рис. 2 приведены значения пористости оксидных покрытий для сталей 20 и 12Х18Н10Т, полученные различными способами.

а) *б*)

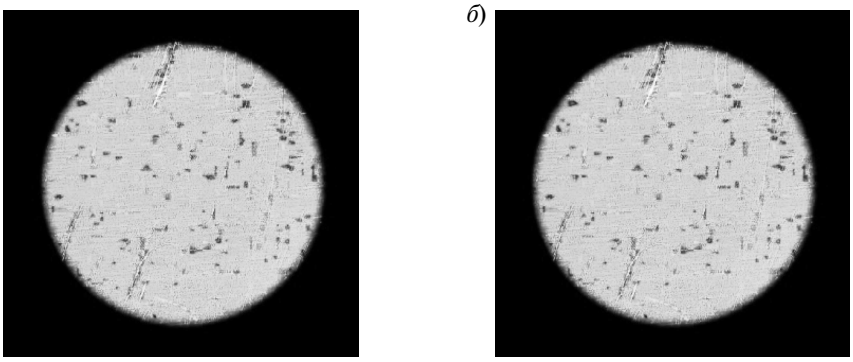


Рис. 1. Примеры фотографий поверхности образцов сталей 20 и 12Х18Н10Т, оксидированных термическим способом и обработанных в растворе железосинеродистого калия (*а* — сталь 20; *б* — сталь 12Х18Н10Т): $T = 350$ °С; время оксидирования — 90 мин;

Пористость оксидных покрытий сталей 20 и 12Х18Н10Т в зависимости от способа оксидирования

Тип стали	Способ оксидирования	T, °С	Время, мин.	П, %
Сталь 20	Оксидирование на воздухе	350	30	1,17
			60	1,65
			90	1,56
	Химическое оксидирование, состав раствора № 1	135	60	0,15
			90	0,12
			120	0,05
	Химическое оксидирование, состав раствора № 2	145	60	0,11
			90	0,08
			120	0,04
	Химическое оксид. в расплаве NaOH	350	10	0,39
			15	0,097
			30	0,049
	Анодное оксидирование, при $I = 30$ мА/см^2	100	30	0,44
			60	0,098
			120	0,078
	при $I = 60$ мА/см^2		60	0,08
			90	0.075

Окончание табл.

Тип стали	Способ оксидирования	*T*, °C	Время, мин.	П, %
12Х18Н10Т	Оксидирование на воздухе	350	60	0,003
			90	0,01
		700	60	0,002
			90	0,005
	Химическое оксидирование, состав раствора № 1	135	60	0,001
			90	0
			120	0,0001
	Химическое оксидирование, состав раствора № 2	145	60	0,02
			90	0,046
			120	0,015
	Химическое оксид. в расплаве NaOH	350	10	0
			15	0,0015
			30	0,049
	Анодное оксидирование, при $I = 30$ мА/см^2	100	60	0,015
			120	0,0025
	при $I = 60$ мА/см^2		60	0
			120	0

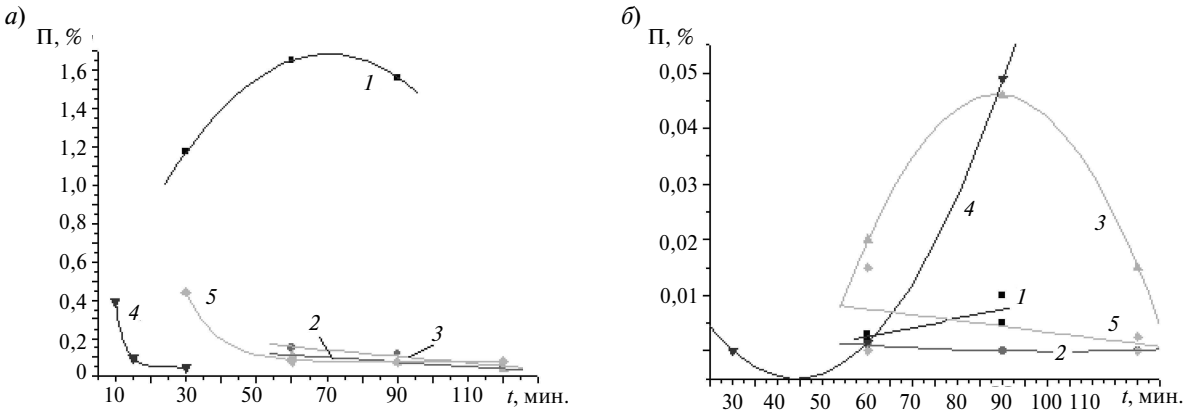


Рис. 2. Зависимость пористости оксидных покрытий на сталях 20 и 12Х18Н10Т от времени обработки при различных способах оксидирования:

а — сталь 20; *1* — термическое оксидирование; *2* — химическое оксидирование в растворе № 1; *3* — химическое оксидирование в растворе № 2; *4* — химическое оксидирование в расплаве NaOH; *5* — анодное оксидирование;
б — сталь 12Х18Н10Т: *1* — термическое оксидирование; *2* — химическое оксидирование в растворе № 1; *3* — химическое оксидирование в растворе № 2; *4* — химическое оксидирование в расплаве NaOH; *5* — анодное оксидирование

Как видно из приведенных данных в таблице и на рис. 2, при времени оксидирования более 60 минут (в случае расплава NaOH — 30 мин.) качественные, с низкой пористостью оксидные покрытия на углеродистых сталях можно получить с помощью химического и анодного способа оксидирования (наиболее пористые оксиды получены при термическом оксидировании стали 20). На высоколегированных сталях (типа 12Х18Н10Т) при времени оксидирования 60 минут (в случае расплава NaOH — 15 мин.) — с помощью любого из рассмотренных способов оксидирования (более пористые оксиды на наших сталях получены при способе химического оксидирования в растворе № 2 при времени обработки 90–120 мин и в расплаве NaOH при времени оксидирования 30 мин.).

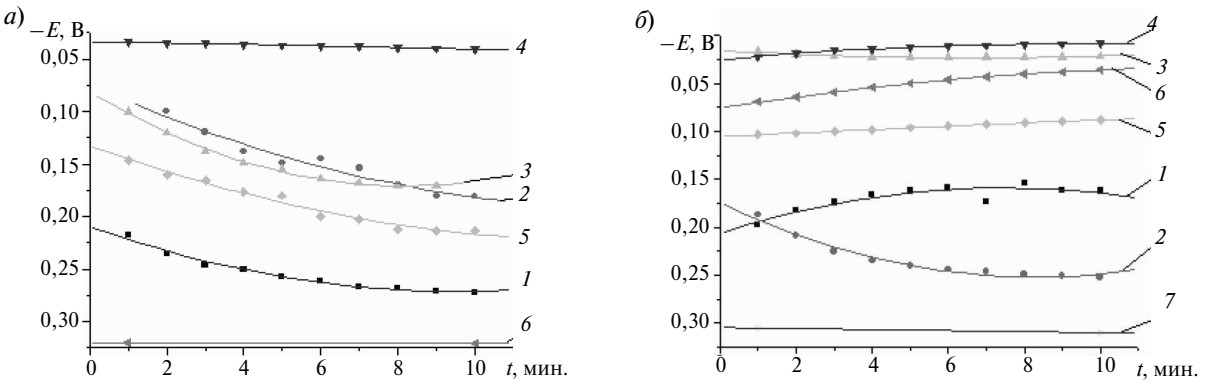


Рис. 3. Зависимость стационарного потенциала оксидированных стальных образцов от времени выдержки в растворе NaCI и способа оксидирования стали:

а — сталь 20; *1* — термическое оксидирование; *2* — химическое оксидирование в растворе № 1; *3* — химическое оксидирование в растворе № 2; *4* — химическое оксидирование в расплаве NaOH; *5* — анодное оксидирование (I = 30 мА/см^2); *6* — не оксидированный образец;

б — сталь 12Х18Н10Т; 1 — (700 °С) и *2* (350 °С) — термическое оксидирование; *3* — химическое оксидирование в растворе № 1; *4* — химическое оксидирование в растворе № 2; *5* — химическое оксидирование в расплаве NaOH; *6* — анодное оксидирование (I = 30 мА/см^2); *7* — неоксидированный образец

Время оксидирования образцов в расплаве NaOH — 30 мин, а для остальных режимов — 60 мин.

На рис. 3 приведены значения стационарных потенциалов образцов сталей 20 и 12Х18Н10Т, оксидированных разными способами.

Измерения потенциалов относительно хлорсеребряного электрода сравнения проводились в водном растворе 0,5М NaCI при комнатной температуре. В качестве сравнения приведены также значения потенциала неоксидированного образца. Как и ожидалось, в случае оксидированных образцов наблюдается сдвиг потенциала в сторону более положительных значений в сравнении с неоксидированным образцом. Из результатов измерения стационарных потенциалов следует, что для стали 20 в соответствии с выше приведенными значениями пористости оксидов и с учетом способа оксидирования минимальный сдвиг потенциала наблюдается в случае термического метода оксидирования, а максимальный — при оксидировании в расплаве NaOH.

В случае легированной стали 12Х18Н10Т согласно данным рис. 4 минимальной пористостью обладают оксиды, полученные химическим оксидированием в растворе № 2 и в расплаве NaOH, а также анодным оксидированием. Таким образом, полученные результаты обоих методов удовлетворительно согласуются.

Установлено (на примере стали 20), что при оксидировании углеродистых сталей, качественные оксидные покрытия можно получить с помощью методов химического и анодного оксидирования.

В случае стали 12Х18Н10Т показано, что при оксидировании легированных сталей наиболее качественные оксидные покрытия можно получить с помощью всех рассмотренных методов оксидирования при времени оксидирования не менее 60 минут.

Установлено, что результаты оценки пористости оксидных покрытий, полученные с помощью двух методов, удовлетворительно согласуются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Безносов, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносов, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. — М: Изд-во АТ, 2007. — 434 с.

2. **Кравцов, Д.В.** Влияние легирования ферритомартенситных сталей на их коррозионную стойкость в жидком свинце [Текст] / Д.В. Кравцов, С.А. Кохтев, И.А. Мещеринова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.— 2004. № 3 (85).— С. 23–25.

3. **Прозоров, В.В.** Оксидирование перлитных сталей в нитратных растворах [Текст] / В.В. Прозоров // Защита металлов.— 1987. Т. 23, № 2.— С. 12–16.

4. **Борщевский, А.М.** Коррозия и защита металлов [Текст] / А.М. Борщевский, Л.П. Батурова, В.А. Зайцев.— СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1993.— 39 с.

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
(812) 552-63-87
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;
(812) 552-63-87

ОКОВИТЫЙ Владислав Викторович — *студент шестого курса кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-63-87

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 669.2

А.И. Демидов, И.А. Маркелов

ТЕРМОДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА С ГРАФИТОМ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ВЮСТИТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИНТЕРВАЛЕ 900–1600 К

A.I. Demidov, I.A. Markelov

THERMODYNAMICS OF INTERACTION OF IRON OXIDES WITH GRAPHITE TAKING INTO ACCOUNT THE CHANGING OF WUSTITE COMPOSITION WITH TEMPERATURE IN THE TEMPERATURE RANGE 900–1600 K

Проведены расчеты изменения стандартной энергии Гиббса реакций взаимодействия оксидов железа с графитом с образованием оксида углерода II и оксида углерода IV с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры в интервале 900–1600 К на 1 моль атомов исходных веществ. Дан сравнительный анализ результатов расчета и экспериментальных данных по кинетике изученных реакций.

ТЕРМОДИНАМИКА. ВОССТАНОВЛЕНИЕ. ОКСИДЫ ЖЕЛЕЗА. ВЮСТИТ. ГРАФИТ.

In this paper values for the standard Gibbs free energy of the reactions of interaction of iron oxides with graphite were calculated in the temperature range 900–1600 K per 1 mole of precursor atoms. The results were compared with experimental kinetic data.

THERMODYNAMICS. REDUCTION. IRON OXIDES. WUSTITE. GRAPHITE.

Термодинамика взаимодействия оксидов железа с графитом представляет значительный интерес для теоретического обоснования режимов восстановления железных руд, получения железа и чугуна [1–5].

В большинстве работ, касающихся вопроса взаимодействия оксидов железа с графитом, основное внимание уделено кинетике и механизму протекающих реакций. В то же время рассмотрение термодинамики указанных реакций ограничивается расчетом тепловых эффектов и изменения энергии Гиббса без учета изменения состава вюстита при изменении температуры. Поэтому термодинамические расчеты реакций взаимодействия оксидов железа и графита с учетом изменения состава вюстита в зависимости от температуры, в частности изменения энергии Гиббса, представляют определенный интерес.

В работе проведен термодинамический анализ реакций взаимодействия оксидов железа с графитом в интервале 900–1600 К с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными по кинетике изученных реакций.

Систему Fe–O–C можно представить в виде концентрационного треугольника (рис. 1). В таком случае термодинамический расчет реакций взаимодействия оксидов железа с графитом целесообразно проводить по сечениям треугольника, проведенным из угла графита на сторону Fe-O, на соответствующий состав оксида железа, при этом в каждом сечении соотношение кислорода к железу остается постоянным.

Составы системы, отвечающие реакциям (1)–(10), приведены в табл. 1. На рис. 1 составы вюстита, находящегося в равновесии с магнетитом ($FeO_{(1+x'')}$) или с железом ($FeO_{(1+x')}$), обозначены общим символом $FeO_{(1+x)}$. С увеличением температуры изменяется состав вюстита, находящегося в равновесии с магнетитом ($FeO_{(1+x'')}$) или с железом ($FeO_{(1+x')}$), поэтому положение составов системы, отвечающих реакциям (2), (3), (5), (6) и (8)–(10) на концентрационном треугольнике Fe–O–C, тоже меняется, но незначительно.

Таблица 1

Составы системы, отвечающие реакциям (1)–(10), на концентрационном треугольнике Fe–O–C

Элемент	Содержание, %, в зависимости от реакции									
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
					T = 900 K					
O	56,25	51,33	50,92	37,50	51,50	51,04	36,36	51,29	34,15	33,91
Fe	37,50	34,22	33,95	25,00	38,63	38,28	27,28	47,59	31,70	32,18
C	6,25	14,45	15,13	37,50	9,87	10,68	36,36	1,12	34,15	33,91
					T = 1000 K					
O		51,73	50,86		51,95	50,96		51,17	34,38	33,88
Fe	–	34,48	33,90	–	38,96	38,22	–	46,52	31,24	32,24
C		13,79	15,24		9,09	10,82		2,31	34,38	33,88
					T = 1100 K					
O		52,02	50,83		52,28	50,93		51,12	34,53	33,86
Fe	–	34,68	33,88	–	39,21	38,20	–	45,79	30,94	32,28
C		13,30	15,29		8,51	10,87		3,09	34,53	33,86
					T = 1200 K					
O		52,27	50,82		52,57	50,92		51,09	34,67	33,85
Fe	–	34,85	33,88	–	39,43	38,19	–	45,20	30,66	32,30
C		12,88	15,30		8,00	10,89		3,71	34,67	33,85
					T = 1300 K					
O		52,50	50,82		52,84	50,92		51,08	34,79	33,85
Fe	–	35,00	33,88	–	39,63	38,19	–	44,68	30,42	32,30
C		12,50	15,30		7,53	10,89		4,24	34,79	33,85
					T = 1400 K					
O		52,73	50,82		53,09	50,92		51,07	34,90	33,85
Fe	–	35,15	33,88	–	39,81	38,19	–	44,21	30,20	32,30
C		12,12	15,30		7,10	10,89		4,72	34,90	33,85
					T = 1500 K					
O		52,97	50,83		53,37	50,94		51,08	35,01	33,86
Fe	–	35,31	33,89	–	40,02	38,20	–	43,72	29,98	32,28
C		11,72	15,28		6,61	10,86		5,20	35,01	33,86
					T = 1600 K					
O		53,27	50,86		53,70	50,97		51,10	35,15	33,88
Fe	–	35,51	33,91	–	40,28	38,23	–	43,16	29,70	32,24
C		11,22	15,23		6,02	10,80		5,74	35,15	33,88

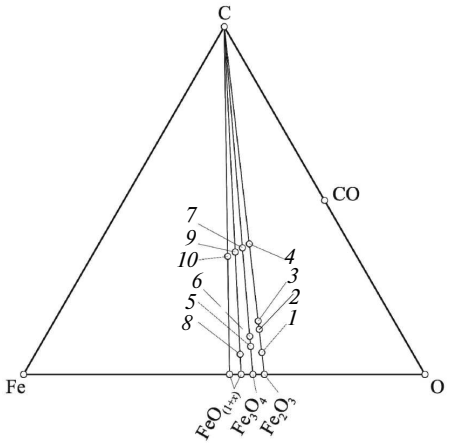


Рис. 1. Концентрационный треугольник Fe–O–C с координатами реакций (1)–(10)

Проводили расчет изменения стандартной энергии Гиббса G реакций на 1 моль атомов исходных веществ, как это было выполнено в работах [6, 7]. Исходные данные для расчетов взяты из справочника [8]. Значения функции G для вюстита, находящегося в равновесии с магнетитом ($FeO_{(1+x'')}$) или с железом ($FeO_{(1+x')}$), с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры взяты из работы [9].

Газообразными продуктами реакций взаимодействия оксидов железа с графитом могут быть оксид углерода II и оксид углерода IV. В первом случае уравнения реакций восстановления оксида железа III графитом в расчете на 1 моль атомов исходных веществ могут быть записаны следующим образом:

$$(3Fe_2O_3 + C = 2Fe_3O_4 + CO)/16; \quad (1)$$

$$(2Fe_3O_4 + CO + 2(1-3x'')C = 6FeO_{(1+x'')} + 3(1-2x'')CO)/6(3-x''); \quad (2)$$

$$(6FeO_{(1+x'')} + 3(1-2x'')CO + 6(x''-x')C = 6FeO_{(1+x')} + 3(1-2x')CO)/6(3-x''); \quad (3)$$

$$(6FeO_{(1+x')} + 3(1-2x')CO + 6(1+x')C = 6Fe + 9CO)/24. \quad (4)$$

В уравнении реакции (1) отношение кислорода к железу равно 1,500. Для сохранения в уравнениях реакций (2)–(4) такого же отношения кислорода к железу продукты реакций (1)–(3) приняты исходными веществами соответственно для реакций (2)–(4).

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Как видно из нее, изменения стандартной энергии Гиббса реакций (1) и (2) в указанном интервале температур отрицательны, следовательно, равновесие реакций сдвинуто в сторону образования продуктов реакций. Изменения стандартной энергии Гиббса реакций (3) и (4) становятся отрицательными при температурах выше соответственно 1000 и 900 K, значит, равновесие реакций сдвигается в сторону образования продуктов реакций.

Уравнения реакций восстановления оксида железа III, II графитом, когда газообразным продуктом реакций является оксид углерода II, следующие:

$$(Fe_3O_4 + (1-3x'')C = 3FeO_{(1+x'')} + (1-3x'')CO)/(8-3x''); \quad (5)$$

$$(3FeO_{(1+x'')} + (1-3x'')CO + 3(x''-x')C = 3FeO_{(1+x')} + (1-3x')CO)/(8-3x'); \quad (6)$$

$$(3FeO_{(1+x')} + (1-3x')CO + 3(1+x')C = 3Fe + 4CO)/11. \quad (7)$$

Таблица 2

Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (1)–(4) в интервале температур 900–1600 K

T, K	$1+x'$	$1+x''$	ΔG, кДж/моль, в разных реакциях			
			(1)	(2)	(3)	(4)
900	1,0542	1,0777	–73,90	–41,10	0,30	3,70
1000	1,0504	1,1000	–76,05	–44,67	0,06	–0,31
1100	1,0488	1,1164	–78,30	–48,06	–0,37	–4,33
1200	1,0483	1,1303	–80,62	–51,22	–1,20	–8,26
1300	1,0483	1,1431	–82,99	–54,41	–1,92	–12,27
1400	1,0483	1,1551	–85,43	–57,44	–2,83	–16,28
1500	1,0492	1,1682	–87,91	–60,37	–3,89	–20,28
1600	1,0509	1,1839	–90,45	–63,11	–5,20	–24,30

В уравнении реакции (5) отношение кислорода к железу равно 1,333. Для сохранения в уравнениях реакций (6) и (7) такого же отношения кислорода к железу продукты реакций (5) и (6) приняты исходными веществами соответственно для реакций (6) и (7). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что изменения стандартной энергии Гиббса реакции (5) в указанном интервале температур отрицательны, следовательно, равновесие реакции сдвинуто в сторону образования вюстита, обогащенного кислородом. Изменения стандартной энергии Гиббса реакций (6) и (7) становятся отрицательными при температурах соответственно выше 1000 и 900 K, следовательно, равновесие реакций сдвигается в сторону образования продуктов реакций.

В случае, когда газообразным продуктом реакций восстановления вюстита графитом будет оксид углерода II, уравнения реакций выглядят следующим образом:

$$(FeO_{(1+x'')} + (x''-x')C = \\ = FeO_{(1+x')} + (x''-x')CO)\ /(2 + 2x''-x'); \quad (8)$$

$$(FeO_{(1+x')} + (x''-x')CO + (1 + x)C = \\ = Fe + (1 + x'')CO)\ /(3 + 2x'); \quad (9)$$

$$(FeO_{(1+x')} + (1 + x')C = \\ = Fe + (1 + x')CO)\ /(3 + 2x'). \quad (10)$$

В уравнении реакции (8) отношение кислорода к железу постоянно при данной температуре. Для сохранения в уравнениях реакций (9) и (10) отношения кислорода к железу, равного $(1 + x'')$, продукты реакций (8) и (9) были исходными веществами соответственно для реакций (9) и (10). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, равновесие реакций (8), (9), (10) восстановления вюстита в большей степени сдвигается в сторону образования продуктов реакций при температурах соответственно выше 1000 и 900 K.

В случае, когда газообразный продукт реакций взаимодействия оксидов железа с графитом — оксид углерода (IV), составы системы (рис. 2, табл. 4) отличаются от приведенных выше (см. рис. 1, табл. 1).

Уравнения реакций восстановления оксида железа III графитом в расчете на 1 моль атомов исходных веществ в этом случае могут быть записаны следующим образом:

$$(6Fe_2O_3 + C = 4Fe_3O_4 + CO_2)\ /31; \quad (11)$$

$$(4Fe_3O_4 + CO_2 + 2(1-3x'')C = \\ = 12FeO_{(1+x'')} + 3(1-2x'')CO_2)\ /3(11-2x''); \quad (12)$$

$$(12FeO_{(1+x'')} + 3(1-2x'')CO_2 + 6(x''-x')C = \\ = 12FeO_{(1+x')} + 3(1-2x')CO_2)\ /3(11-2x'); \quad (13)$$

$$(12FeO_{(1+x')} + 3(1-2x')CO_2 + 6(1 + x')C = \\ = 12Fe + 9CO_2)\ /39. \quad (14)$$

В табл. 5 представлены результаты расчетов изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (11)–(14) в интервале температур 900–1600 K. Как видно из табл. 5, изменения стандартной энергии Гиббса реакций (11) и (12) отрицательны, следовательно, равновесие реакций сдвинуто в сторону образования продуктов реакций. Изменения стандартной энергии Гиббса реакций (13) и (14) становятся отрицательными при температурах выше 1000 K, то есть равновесие реакций сдвигается вправо, в сторону получения соответственно вюстита, обогащенного железом, и металлического железа.

Таблица 3

Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (5)–(10) в интервале температур 900–1600 K

T, K	ΔG°, кДж/моль, для разных реакций					
	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
900	–46,39	0,34	4,04	0,42	4,69	4,76
1000	–50,47	0,07	–0,34	0,09	–0,39	–0,40
1100	–54,34	–0,42	–4,72	–0,50	–5,36	–5,59
1200	–57,95	–1,35	–9,01	–1,60	–10,13	–10,67
1300	–61,59	–2,17	–13,39	–2,53	–14,94	–15,86
1400	–65,06	–3,19	–17,75	–3,70	–19,67	–21,02
1500	–68,42	–4,39	–22,12	–5,02	–24,31	–26,18
1600	–71,59	–5,86	–26,51	–6,62	–28,86	–31,33

Таблица 4

Составы системы, отвечающие реакциям (11)–(20), на концентрационном треугольнике Fe–O–C

Содержание, элемент	Содержание, %, для разных реакций и температур									
	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)
					T = 900 K					
O	58,06	55,33	55,09	46,15	54,18	53,92	44,45	51,58	41,19	40,84
Fe	38,71	36,88	36,72	30,77	40,63	40,44	33,33	47,86	38,22	38,74
C	3,23	7,79	8,19	23,08	5,19	5,64	22,22	0,56	20,59	20,42
					T = 1000 K					
O	–	55,55	55,05	–	54,42	53,88	–	51,77	41,51	40,78
Fe	–	37,04	36,70	–	40,82	40,41	–	47,06	37,74	38,83
C	–	7,41	8,25	–	4,76	5,71	–	1,17	20,75	20,39
					T = 1100 K					
O	–	55,72	55,03	–	54,61	53,86	–	51,92	41,74	40,76
Fe	–	37,15	36,69	–	40,95	40,39	–	46,51	37,39	38,86
C	–	7,13	8,28	–	4,44	5,75	–	1,57	20,87	20,38
					T = 1200 K					
O	–	55,87	55,03	–	54,76	53,85	–	52,06	41,93	40,75
Fe	–	37,25	36,69	–	41,07	40,39	–	46,05	37,10	38,87
C	–	6,88	8,28	–	4,17	5,76	–	1,89	20,97	20,38
					T = 1300 K					
O	–	56,00	55,03	–	54,90	53,85	–	52,19	42,11	40,75
Fe	–	37,34	36,69	–	41,18	40,39	–	45,65	36,84	38,87
C	–	6,66	8,28	–	3,92	5,76	–	2,16	21,05	20,38
					T = 1400 K					
O	–	56,13	55,03	–	55,04	53,85	–	52,30	42,27	40,75
Fe	–	37,42	36,69	–	41,28	40,39	–	45,28	36,59	38,87
C	–	6,45	8,28	–	3,68	5,76	–	2,42	21,14	20,38
					T = 1500 K					
O	–	56,27	55,04	–	55,19	53,86	–	52,44	42,45	40,77
Fe	–	37,51	36,69	–	41,39	40,40	–	44,89	36,33	38,85
C	–	6,22	8,27	–	3,42	5,74	–	2,67	21,22	20,38
					T = 1600 K					
O	–	56,43	55,06	–	55,37	53,88	–	52,61	42,65	40,79
Fe	–	37,62	36,70	–	41,53	40,41	–	44,44	36,03	38,81
C	–	5,95	8,24	–	3,10	5,71	–	2,95	21,32	20,40

Из сравнения данных табл. 2 и 5 следует, что при температурах 900–1600 K равновесия реакций (1), (2), (11) и (12) взаимодействия оксидов железа III и железа III, II с графитом характеризуются близкими отрицательными значениями изменения стандартной энергии Гиббса, что свидетельствует о том, что газообразными продуктами реакций в равной степени могут быть оксиды углерода II и IV.

Экспериментальные данные работы [10] по изучению кинетики восстановления оксида железа III графитом при 1223 K показывают, что в начальный период реакции в газовой фазе приблизительно в равной степени присутствуют оксиды углерода II и IV.

В случае, когда газообразныйм продукт реакций восстановления оксида железа III, II графитом — оксид углерода IV, уравнения реакций выглядят следующим образом:

$$(2Fe_3O_4 + (1-3x'')C = 6FeO_{(1+x'')} + (1-3x'')CO_2)/(15-3x''); \quad (15)$$

$$(6FeO_{(1+x'')} + (1-3x'')CO_2 + 3(x''-x')C = 6FeO_{(1+x')} + (1-3x')CO_2)/(15-3x'); \quad (16)$$

$$(6FeO_{(1+x')} + (1-3x')CO_2 + 3(1+x')C = 6Fe + 4CO_2)/18. \quad (17)$$

Результаты расчетов изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (15)–(17) в интервале температур 900–1600 K представлены в табл. 6. Из нее видно, что изменения стандартной энергии Гиббса реакции (15) в указанном интервале температур отрицательны, следовательно, равновесие реакции сдвинуто в сторону образования вюстита, обогащенного кислородом.

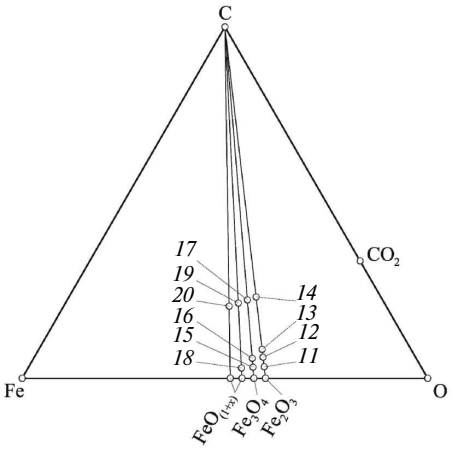


Рис. 2. Концентрационный треугольник Fe–O–C с координатами реакций (11)–(20)

Изменения стандартной энергии Гиббса реакций (16) и (17) становятся отрицательными при температурах выше 1000 K, значит, равновесие реакций сдвигается в сторону получения соответственно вюстита, обогащенного железом, и металлического железа.

Из сравнения данных табл. 3 и 6 видно, что при температурах 900–1600 K равновесия реакций (5) и (15) взаимодействия оксидов железа (III, II) с графитом характеризуются близкими отрицательными значениями изменения стандартной энергии Гиббса, что свидетельствует о том, что газообразными продуктами реакций в равной степени могут быть оксиды углерода II и IV.

Таблица 5

Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (11)–(14) в интервале температур 900–1600 K

T, K	Δ*G*, кДж/моль, для разных реакций			
	(11)	(12)	(13)	(14)
900	–76,70	–44,91	0,27	2,46
1000	–78,35	–47,78	0,11	0,37
1100	–80,11	–50,59	–0,13	–1,75
1200	–81,94	–53,25	–0,70	–3,78
1300	–83,83	–56,01	–1,09	–5,92
1400	–85,79	–58,67	–1,61	–8,07
1500	–87,80	–61,29	–2,22	–10,21
1600	–89,87	–63,82	–2,98	–12,37

Таблица 6

Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (15)–(20) в интервале температур 900–1600 K

T, K	Δ*G*, кДж/моль, для разных реакций					
	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)
900	–49,47	0,29	2,66	0,35	3,05	3,09
1000	–52,65	0,12	0,40	0,14	0,45	0,47
1100	–55,77	–0,14	–1,89	–0,16	–2,12	–2,21
1200	–58,71	–0,77	–4,09	–0,88	–4,56	–4,77
1300	–61,77	–1,20	–6,42	–1,36	–7,09	–7,48
1400	–64,73	–1,78	–8,74	–1,99	–9,59	–10,19
1500	–67,64	–2,45	–11,06	–2,72	–12,06	–12,89
1600	–70,44	–3,28	–13,40	–3,61	–14,48	–15,61

Экспериментальные данные работы [10] по изучению кинетики восстановления оксида железа III, II графитом при 1223 K показывают, что в начальный период реакции в газовой фазе приблизительно в равной степени присутствуют оксиды углерода II и IV.

Если газообразным продуктом реакций восстановления вюстита графитом — оксид углерода IV, уравнения реакций записываются следующим образом:

$$(2FeO_{(1+x'')} + (x'' - x')C = 2FeO_{(1+x')} + (x'' - x')CO_2)/(4 + 3x'' - x'); \quad (18)$$

$$(2FeO_{(1+x')} + (x'' - x')CO_2 + (1 + x)C = 2Fe + (1 + x'')CO_2)/(5 + 3x''); \quad (19)$$

$$(2FeO_{(1+x')} + (1 + x')C = 2Fe + (1 + x')CO_2)/(5 + 3x'). \quad (20)$$

В табл. 6 представлены результаты расчетов изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (18)–(20) в интервале температур 900–1600 K. Из табл. 6 видно, что изменения стандартной энергии Гиббса указанных реакций становятся отрицательными при температурах выше 1000 K, следовательно, равновесие реакций сдвигается в сторону образования продуктов реакций.

Анализ данных табл. 3 и 6 показывает, что значения изменения стандартной энергии Гиббса реакций (8), (9), (18) и (19) восстановления вюстита графитом характеризуются более положительными величинами по сравнению со значениями изменения стандартной энергии Гиббса реакций (5) и (15) восстановления оксида железа III, II графитом. Это свидетельствует о том, что равновесие реакций (8), (9), (18) и (19) восстановления вюстита графитом в большей степени сдвинуто в сторону исходных веществ, чем равновесие реакций (5) и (15).

Данный факт подтверждается экспериментальными данными по кинетике процесса восстановления оксида железа III графитом при температурах 1173–1373 K [11, 12]. После быстрого завершения первой ступени процесса восстановления ($Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$) получала развитие вторая ступень ($Fe_3O_4 \rightarrow FeO$), но с резко замедленными скоростями; особенно медленно проходило восстановление вюстита на этапе от максимального содержания кислорода до минимального.

Сравнение данных табл. 3 и 6 показывает, что выше 1000 K изменения стандартной энергии Гиббса реакции (10) характеризуются более отрицательными значениями по сравнению с реакцией (20), т. е. при взаимодействии вюстита, обогащенного кислородом, с графитом в газовой фазе следует ожидать большего содержания оксида углерода II по сравнению с оксидом углерода IV. По данным работ [10, 12] при восстановлении вюстита до железа графитом в интервале 1223–1273 K газовая фаза состоит приблизительно на 70–80 % из оксида углерода II.

Из данных табл. 3 и 6 видно, что равновесие реакций (10) и (20) восстановления вюстита, равновесного с железом, до металлического железа в большей степени сдвигается в сторону продуктов реакций при температурах соответственно выше 900 и 1000 K. Следовательно, при этих температурах следует ожидать появления металлического железа, что подтверждается экспериментальными данными: при 973 K замет-

ного восстановления оксида железа III, II графитом не обнаружено; при 1073 K отмечено появление металлического железа [2, 10].

Полученные результаты расчетов изменения стандартной энергии Гиббса реакций взаимодействия оксидов железа и графита с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры в интервале 900–1600 K на 1 моль атомов исходных веществ согласуются с экспериментальными данными по кинетике изученных реакций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Павлов, М.А.** Металлургия чугуна. Ч. 2. Доменный процесс [Текст] / М.А. Павлов.— 6-е изд.— М.: Металлургиздат, 1949. 628 с.

2. **Байков, А.А.** Восстановление окислов железа твердым углеродом [Текст] / А.А. Байков, А.С. Тумарев // Изв. АН СССР. ОТН.— 1937. № 1.— С. 25–47.

3. **Шенк, Г.** Физико-химия металлургических процессов. Ч. 1. Химико-металлургические реакции и их законы [Текст] / Г. Шенк / Пер. с нем. под ред. Б.Л. Фрадкина.— Харьков: Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1935.— 384 с.

4. **Есин, О.А.** Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1. Реакции между газообразными и твердыми фазами [Текст] / О.А. Есин, П.В. Гельд.— Свердловск, 1962.— 672 с.

5. Доменное производство [Текст]: Справ. изд. в 2 т. Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Е.Ф. Вегмана.— М.: Металлургия, 1989.— 469 с.

6. **Демидов, А.И.** Термодинамика взаимодействия углерода с кислородом [Текст] / А.И. Демидов, И.А. Маркелов // ЖПХ.— 2005. Т. 78, № 4.— С. 721–724.

7. **Демидов, А.И.** Термодинамика горения топлива у фурм доменной печи [Текст] / А.И. Демидов, И.А. Маркелов // ЖПХ.— 2005. Т. 78, № 9.— С. 1565–1567.

8. **Barin, I.** Thermochemical properties of Inorganic Substances [Текст] / I. Barin, O. Knacke, O. Kubaschewski.— New York: Springer-Verlag, 1973.— 921 p.

9. **Демидов, А.И.** Термодинамика взаимодействия магнетита и вюстита с монооксидом углерода с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры [Текст] / А.И. Демидов, И.А. Маркелов // Научно-техн. ведомости СПбГПУ.— 2013. № 1 (166).— С. 166–169.

10. **Abdel Halim, K.S.** Isothermal reduction behavior of Fe_2O_3/MnO composite materials with solid carbon [Текст] / K.S. Abdel Halim // Materials Science and Engineering A.— 2007. Vol. 452–453.— P. 15–22.

11. **Архаров, В.И.** Исследование восстановления окислов железа графитом [Текст] / В.И. Архаров, В.Н. Богословский, М.Г. Журавлева, Г.И. Чуфаров // ЖФХ.— 1955. Т. XXIX. Вып. 2.— С. 272–279.

12. **Симонов, В.К.** Некоторые вопросы кинетики и механизма восстановления окиси железа углеродом [Текст] / В.К. Симонов, С.Т. Ростовцев // Изв. вузов. Сер.: Черная металлургия.— 1960. № 4.— С. 5–18.

ДЕМИДОВ Александр Иванович — *доктор химических наук, профессор кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 3223083
demidov1902@gmail.com

МАРКЕЛОВ Илья Александрович — *аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
markelov-ia@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.9.011

Д.Ю. Фомин

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В СТАЛЯХ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА ПРИ ШТАМПОВКЕ В ОТКРЫТЫХ ШТАМПАХ

D.Yu. Fomin

STRUCTURE FORMATION IN AUSTENITIC STEELS UNDER FORGING IN OPEN STAMPS

Рассматриваются вопросы протекания полигонизации и рекристаллизации в сталях аустенитного класса при применении термомеханической обработки в схемах облойной штамповки поковок. Анализируются структурные превращения тонкой структуры аустенитной стали.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. ШТАМПОВКА. ОТКРЫТЫЙ ШТАМП. ПРОСВЕЧИВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ. ТОНКАЯ СТРУКТУРА. РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ.

Recrystallization in austenitic steels under thermomechanical treatment for the process of forging metal performs in open stamps are observed. Structural transformations on the sub- structural level of austenitic steel are analyzed.

THERMOMECHANICAL TREATMENT. FORGING. OPEN STAMP. TRANSLUCENT ELECTRON MICROSCOPY. SUBSTRUCTURE. RECRYSTALLIZATION.

Современные работы по изучению процессов рекристаллизации в сталях при термомеханической обработке посвящены в основном прокатке [1]. Относительно применения термомеханической обработки (ТМО) при штамповке поковок в открытых штампах имеется весьма ограниченное число работ [1]; кроме того, нет работ, посвященных исследованиям развития процессов рекристаллизации в аустенитной стали при штамповке поковок в открытых штампах с применением термомеханической обработки в интервалах температур теплой пластической деформации (0,6–0,7) $T_{пл}$. Причины повышенного внимания к структурным изменениям в сталях, протекающим при ТМО в условиях облойной штамповки, связаны с технологической необходимостью увеличения времени выдержки после окончания деформации для обрезки заусенца, что не позволяет организовать немедленную закалку, а это инициирует процессы рекристаллизации, приводящие к понижению прочности стали.

Задачей исследований было изучить закономерности формирования структуры аустенитных сталей при применении термомеханической обработки к облойной штамповке. Цель — выявить параметры режимов ТМО, управление которыми позволит программировать конечную структуру, а следовательно, свойства аустенитной стали при штамповке в открытых штампах.

Изучение вопросов формирования структуры производилось на образцах из стали марки 08Х18Н18Т, полученных при физическом моделировании режимов ТМО на пластомере Gleeble 3800, а также штамповкой поковки тип «тяга соединительная». Температурно-временной цикл технологического процесса ТМО назначался следующим: аустенизация при температуре Ac_3+(350–400) °С; деформация при температуре $T_д$ = (0,6–0,7) $T_{пл}$ со скоростью 5 $с^{-1}$ и степенью деформации ε = 30 %; последеформационная пауза не более 40 сек.; высокоскоростное охлаждение. Отработанные режимы представлены в табл. 1. Варьируемыми параметрами были температура деформирования $T_д$ в интервале 1000–1100 °С и время последеформационной паузы в интервале 20–40 сек.

Анализ изменений в структуре аустенитной стали на межкристаллитном уровне производился на образцах, полученных с помощью

пластомера Gleeble 3800 (рис. 1, *а–б*). Изготовление шлифов проводилось в соответствии с РД 5.9555–74 «Металлы и сплавы. Изготовление и травление металлографических микрошлифов» с использованием комплексной лаборатории пробоподготовки фирмы АТМ. Для количественной оценки размеров зерен использовали анализатор изображения Clemex. Методы выявления и определения величины зерна соответствовали ГОСТ 5639–82. В результате были получены данные, что в температурном интервале теплой пластической деформации (0,6–0,7) $T_{пл}$ при повышении времени последеформационной выдержки с 20 до 40 с происходит увеличение среднего размера зерна аустенита с 39,4 мкм (рис. 1, *а*) до 87,4 мкм (рис. 1, *б*).

Таблица 1

Режимы термомеханической обработки

Режим	Температура деформирования $T_д$, °С	Время последеформационной паузы $\tau_{подст}$, сек.
1	1000	20
2	1100	20
3	1100	40

Исследования тонкой структуры производили на образцах, вырезанных из поковок типа «тяга соединительная». Для этого использовали просвечивающий электронный микроскоп FEI Tecnai G^2 30 S-TWIN при ускоряющем напряжении 200 кВ. Плотность дислокаций измеряли по методу секущих. Для получения заготовок тонких фольг брали среднюю часть образцов. Из них вытачивали прутки длиной 10 мм диаметром 3 мм. Выточенные прутки при помощи высокоточного низкоскоростного отрезного станка Struers «Minitom» нарезали на заготовки толщиной 0,7 мм, после чего утоняли на шлифовальной бумаге до толщины 0,1 мм. Тонкие фольги изготавливались методом электролитического утонения в хлорно-спиртовом электролите А-II при напряжении 23 В и температуре +2 °С при помощи установки Struers «Tenupol-5». Для очистки тонких фольг от оксидной пленки применялась установка ионного утонения Fischione Ion Mill Model 1010.

Тонкая структура образца стали 08Х18Н10Т после пластической деформации при температуре 1000 °С и последеформационной выдержки в течение 20 сек. состоит в основном из фрагментированной компоненты (рис. 2, *а–б*), доля которой оценивается в 80 %. Размер фрагментов, разделенных малоугловыми границами, — около 0,8–1,2 мкм. Высокая плотность дислокаций внутри фрагментов — $(2,4–3,0)\cdot10^{13}$ м$^{-2}$ — и наличие оборванных границ позволяют предположить, что эта фрагментированная структура образовалась в процессе горячей деформации, а не в ходе возврата/полигонизации при последеформационной выдержке 40 сек.

Другой компонентой тонкой структуры являются зерна, видимо, подвергшиеся меньшей степени деформации. Доля этой компоненты — около 10 %; фрагменты в ней разделены дислокационными субграницами с углом разориентировки в десятые доли градуса и имеют размер около 1–2 мкм. Плотность дислокаций здесь $(2,5–3,5)\cdot10^{13}$ м$^{-2}$. Снимки этой структурной составляющей приведены на рис. 2, *в*.

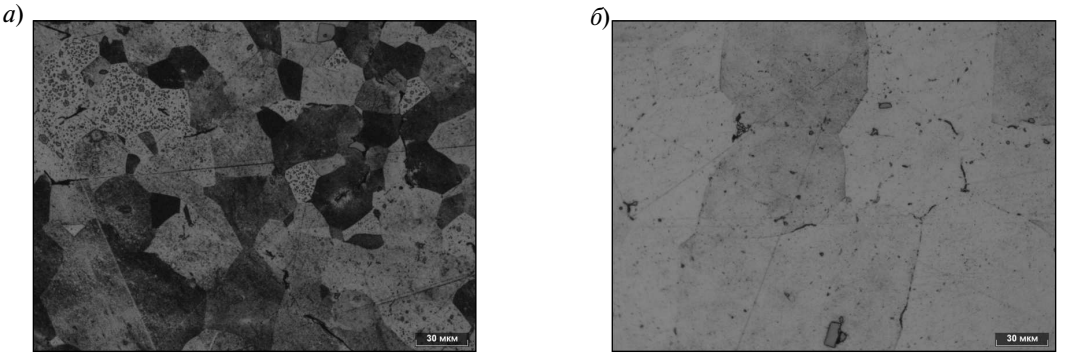


Рис. 1. Структура стали 08Х18Н10Т при различной температуре деформации, ×500:
а) выдержка 20 сек. при температуре 0,6 $T_{пл}$; *б*) выдержка 40 сек. при температуре 0,7 $T_{пл}$

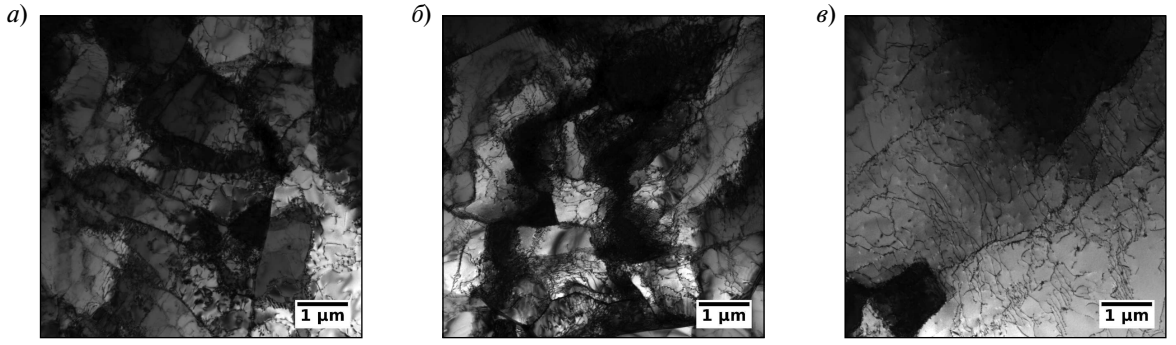


Рис. 2. Тонкая структура стали 08Х18Н10Т, режим 1

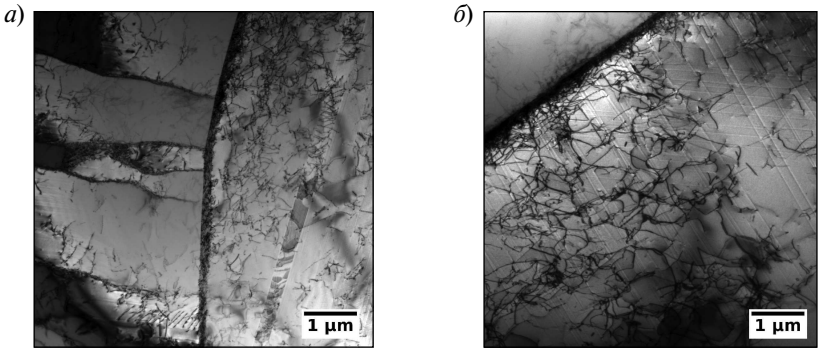


Рис. 3. Тонкая структура стали 08Х18Н10Т, режим 1: *а* — фрагментированная и горяченаклепанная структура; *б* — горяченаклепанная структура

Кроме фрагментированной составляющей в тонкой структуре обнаружена горяченаклепанная субструктура, размер зерен которой более 10 мкм. В горяченаклепанной составляющей дислокации распределены равномерно по телу зерна и плотность их составляет $(4{,}0–4{,}5)\cdot10^{13}$ м$^{-2}$ (рис. 3, *а–б*).

В структуре образца, изготовленного по режиму 1, не обнаружено признаков рекристаллизации.

Тонкая структура образца стали 08Х18Н10Т после пластической деформации при температуре 1100 °С и последеформационной выдержки в течение 20 сек. представляет собой крупные, как правило более 10 мкм, зерна с равномерно распределенными в них дислокациями (см. рис. 4, *а*). Плотность дислокаций в зернах составляет $(2{,}5–3{,}5)\cdot10^{13}$ м$^{-2}$, что характерно для состояния аустенитной стали после горячего наклепа [2]. В отдельных зернах (рис. 4, *б*) наблюдаются признаки возврата в виде формирования дислокационных субграниц с разориентировками ~ 0,1°. На рис. 4, *б* показана начальная стадия формирования такой субграницы.

В некоторых зернах (рис. 4, *в*), по всей видимости, дислокации перешли в субграницы, которые разделяют отдельные фрагменты исходных зерен друг от друга. Плотность дислокаций в таких областях ниже, чем в зернах, где формирование субграниц еще не началось, и составляет $(0{,}9–1{,}5)\cdot10^{13}$ м$^{-2}$. Также возможно, что эти зерна подверглись меньшему наклепу в процессе горячей деформации.

На исследованных тонких фольгах удалось обнаружить зародыши рекристаллизованного зерна размером около 0,8 мкм (рис. 5).

В тонкой структуре образца стали 08Х18Н10Т после пластической деформации при температуре 1100 °С и последеформационной выдержки

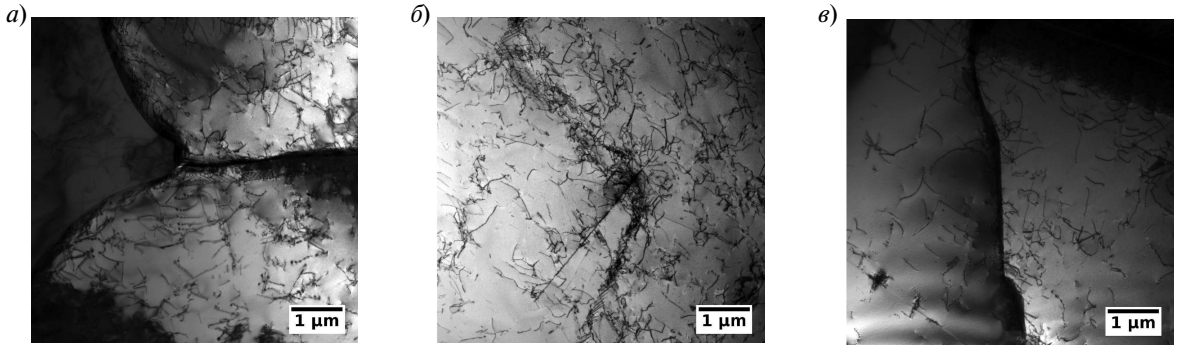


Рис. 4. Тонкая структура стали 08Х18Н10Т, режим 2. Фрагменты зерен и субграницы

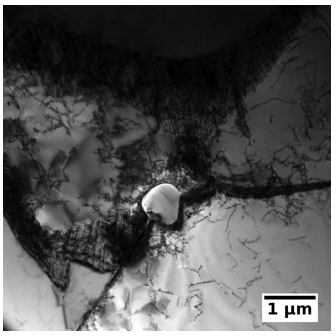


Рис. 5. Тонкая структура стали 08Х18Н10Т, режим 2. Зародыш рекристаллизованного зерна

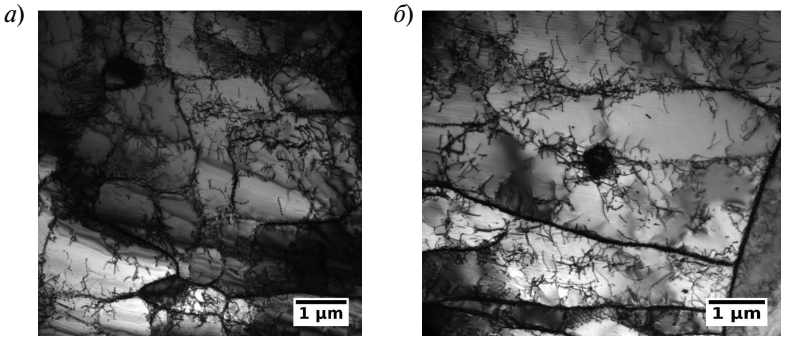


Рис. 6. Тонкая структура стали 08Х18Н10Т, режим 3. Фрагментированная структура

в течение 40 сек. происходит формирование фрагментированной структуры субграниц внутри зерен. Если после выдержки в течение 20 сек. такие субграницы лишь начинали образовываться, то по прошествии 40 сек. после деформации сформировались отчетливые субграницы, разделяющие исходное деформированное зерно на фрагменты размерами 1–2 мкм (рис. 6, *а*, *б*). Доля такой фрагментированной структуры достигает 90%. Плотность дислокаций внутри фрагментов — $(1{,}5–2{,}0)\cdot10^{13}$ м$^{-2}$.

Также в тонкой структуре образца, изготовленного по режиму 3, обнаружены рекристаллизованные зерна размером более 10 мкм (рис. 7). Плотность дислокаций в них около $3\cdot10^{12}$ м$^{-2}$, что на порядок ниже, чем в наклепанных и фрагментированных зернах.

В сводной таблице 2 приведены параметры тонкой структуры исследованных образцов. Принятые сокращения: ГН — горяченаклепанная, Ф — фрагментированная, ЧП — частично полигонизованная; Р — рекристаллизованная

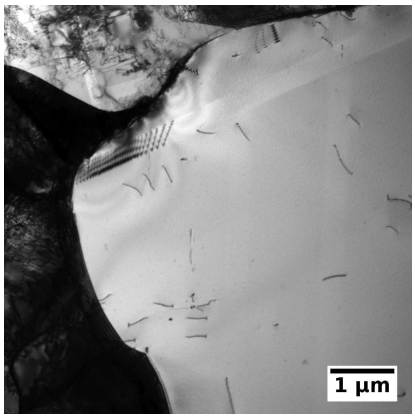


Рис. 7. Тонкая структура стали 08Х18Н10Т, режим 3. Рекристаллизованное зерно.

Таблица 2

Параметры тонкой структуры исследуемых материалов

Образец	Название характеристики компоненты структуры, ед. измерен.	Величина компоненты структуры			
		ГН	Ф	ЧП	Р
1	Объемная доля, %	10	80	10	–
	Размер реек (фрагментов), мкм	>10	0,8–1,2	1–2	–
	Плотность дислокаций, 10^{13} м$^{-2}$	4,0–4,5	2,4–3,0	2,5–3,5	–
2	Объемная доля, %	–	90	10	<1
	Размер реек (фрагментов), мкм	–	>10	>10	0,8
	Плотность дислокаций, 10^{13} м$^{-2}$	–	2,5–3,5	0,9–1,5	–
3	Объемная доля, %	–	90	–	~10
	Размер реек (фрагментов), мкм	–	1–2	–	>10
	Плотность дислокаций, 10^{13} м$^{-2}$	–	1,5–2,0	–	~0,3

Исследования показали следующее:

1. Изменение температуры в интервале 1000–1100 °С не оказывает определяющего влияния на механизм формирования структуры аустенитной стали. Отметим, что уменьшение температуры деформации с 1100 до 1000 °С приводит к формированию горяченаклепанной фрагментированной структуры.

2. Увеличение длительности последеформационной выдержки с 20 до 40 сек. приводит к росту зерна аустенита, доли фрагментированной структуры в стали 08Х18Н10Т, развитию полигонизации и статической рекристаллизации. В процессе выдержки в течение 20–40 сек. в аустенитной стали происходит процесс полигонизации, в ходе которого внутри горяченаклепанных зерен формируется структура субзерен, разделенных малоугловыми границами. При выдержке 40 сек. доля рекристаллизованных зерен выше, чем при выдержке 20 сек. В рассматриваемом диапазоне выдержки происходит начальная стадия рекристаллизации — зарождение центров рекристаллизации. Собирательная рекристаллизация не успевает протекать. Основное влияние на формирование структуры аустенитной стали в рамках рассмотренного техпроцесса при облойной штамповке оказывает время последеформационной выдержки. Регулирование времени выдержки позволяет управлять структурой аустенитной стали. Вероятно, наибольшая прочность будет достигаться при выдержки 20 сек., а улучшение пластических свойств будет происходить с увеличением времени выдержки.

3. Фрагментация субструктуры проходит локально, что, вероятно, говорит о неравномерном распространении очага деформации при штамповке в открытых штампах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коджаспиров, Г.Е.** Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий пластическим деформированием [Текст] / Г.Е. Коджаспиров, А.И. Рудской, В.В. Рыбин.— СПб.: Наука, 2012.

2. **Рыбин, В.В.** Большие пластические деформации и разрушение металлов [Текст] / В.В. Рыбин.— М.: Металлургия.— 1986.— с. 224;

ФОМИН Дмитрий Юрьевич — *аспирант кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул.Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
+7 (812) 552–9302
DmitryFMN@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 669.762.2:669.761

А.Ю. Баймаков, С.Ю. Петрович, В.А. Липин,
А.Л. Шахмин, Е.А. Еремин

ГЕНЕРАЦИЯ ВОДОРОДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ—МАГНИЙ С ВОДОЙ, КИСЛОТНЫМ И ЩЕЛОЧНЫМ РАСТВОРАМИ

A.Yu. Baimakov, S.Yu. Petrovich, V.A. Lipin,
A.L. Shahmin, E.A. Eremin

HYDROGEN GENERATION AT INTERACTION OF POWDERS OF METALS AND ALUMINUM-MAGNESIUM SYSTEM ALLOYS WITH WATER, ACID AND ALKALINE SOLUTIONS

Исследовано взаимодействие порошков алюминия, магния и их сплавов с водой, раствором NaOH ($pH = 11$) и HCl ($pH = 3$). Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на установке «Нано-Фаб 25» изучен фазовый состав образующейся оксидной пленки на поверхности частиц порошков. Определена зависимость выделения водорода от состава сплава и pH раствора. Для генераторов водорода и теплообразующих устройств оптимально использование взаимодействия порошка алюминия с раствором NaOH.

АЛЮМИНИЙ. МАГНИЙ. СПЛАВ. ПОРОШОК. ПОВЕРХНОСТЬ. ОКИСЛЕНИЕ. АЛЮМИНАТ. ВОДОРОД.

Interaction of powders of aluminum, magnesium and their alloys with water, NaOH solution ($pH = 11$) and HCl (pH = 3) is investigated. By the method of X-ray Photoelectron Spectroscopy at «Nano-Fab 25» setting studies phase structure formed оксидной a film on a surface of particles of powders. Dependence of allocation of hydrogen on structure of an alloy and pH solution is defined. For generators of hydrogen and heatforming devices optimum use of powder of aluminum and NaOH solution.

ALUMINIUM. MAGNESIUM. ALLOY. POWDER. SURFACE. OXIDATION. ALUMINATE. HYDROGEN.

Существуют многочисленные автономные устройства, работающие как генераторы тепла и водорода, потребность в которых имеется в самых разных областях техники, в том числе бытовой [1].

Дисперсный алюминий, магний и их смеси, активированные добавками никеля, меди, галлия и др., при взаимодействии с растворами щелочей и кислот могут быть основой простых и относительно дешевых источников выделения тепла и образования водорода [2, 3]. Эти металлы имеют низкую плотность, отличаются доступностью и относительно небольшой ценой.

Сведения о характере взаимодействия сплавов с растворами щелочи и кислоты представляют интерес, так как меняя состав сплавов и реагентов можно управлять процессом и получать необходимую, постоянную во времени интенсивность и длительность работы устройства.

Магний с алюминием в равновесных условиях образуют твердый раствор и два конгруэнтно плавящихся соединения — Mg_5Al_8 и $Mg_{17}Al_{12}$ [4]. Однако в неравновесных условиях быстрого охлаждения, происходящего при получении порошков распылением азотом, образуются сферические частицы, состоящие из гомогенного твердого раствора [1].

Было проведено исследование взаимодействия порошков алюминия, магния и их сплавов с водой, растворами соляной кислоты ($pH = 3$) и гидроксида натрия ($pH = 11$) (см. табл.). Дисперсность порошков находилась в пределах 0—50 мкм.

Таблица 1

Характеристики порошков, использованных в исследованиях

Марка порошка	Содержание Mg + MgO, мас. %	Удельная поверхность*, $см^2/г$	Плотность, $г/см^3$
ПМ-5	99,95	1634	1,74
АМД-50	50±2	913	2,11
АМД-30	30±1	1075	2,31
АМД-10	10±0,5	926	2,55
АСД-1	следы	1287	2,69

* Определяли методом газопроницаемости на приборе ПСХ-8А.

Защитные свойства оксидных пленок на металлах и сплавах характеризует величина коэффициента Пиллинга — Бедворса (α) [1]:

$$\alpha = \frac{M_{\text{оксид}}\rho_{\text{Me}}}{A_{\text{Me}}\rho_{\text{оксид}}n}, \qquad (1)$$

где M — молекулярная масса, A — атомная масса, ρ — плотность, n — число атомов металла в формуле оксида.

При $\alpha > 1$ оксидная пленка защищает металл от окисления, при $\alpha<1$ оксидный слой имеет рыхлую структуру и не обеспечивает надежной защиты металла. По расчету для алюминия — $\alpha = 1{,}45$, для магния — $\alpha = 0{,}81$, следовательно, поверхностная пленка магния не может предотвратить окисление на воздухе и коррозию в водных средах. Поверхностная пленка компактного алюминия, напротив, плотная и служит надежной защитой от взаимодействия с газами и жидкостями [5].

Особенность алюминиевых порошков, полученных газовым распылением азотом с примесью кислорода, в том, что окисление капель происходит до кристаллизации их объема. Затвердевая, металл теряет 17 % объема относительно исходной капли расплава, отчего оксидная пленка оказывается велика по отношению к металлическому ядру, на ней появляются складки и трещинки, снижающие защитные свойства поверхностного слоя [2].

Полученные ранее результаты исследования на электронном микроскопе поверхностной пленки алюминиевого порошка, содержащего 2–3 % магния, показали, что она состоит из аморфного Al_2O_3 и отдельных включений кристаллов MgO [6].

В нашей работе фазовый состав поверхности частиц распыленных порошков сплавов Al–Mg изучали методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на установке «Нано-Фаб 25» [7]. Было установлено, что в поверхностном слое содержится значительно больше магния, чем в сплаве, из которого был получен порошок. Например, поверхностная пленка на частицах порошка, полученного из сплава с практически равным атомным содержанием магния и алюминия, имела 79,4 ат. % Mg и 20,6 ат. % Al от суммы металлов (за вычетом кислорода). Это объясняется тем, что магний — поверхностно-активное вещество по отношению к алюминию, и поэтому поверхностный слой частиц распыленного порошка обогащается им.

В ходе анализа химическое состояние атомов определялось путем сопоставления энергии связи компоненты разложения экспериментального спектра с литературными данными [8, 9]. Количество атомов магния или алюминия в той или иной химической связи определялось исходя из соотношения площадей компонент разложения (рис. 1, *а*, *б*). Эффект «зарядки» определялся по линии C1s, соответствующей C–H связям (285 эВ). В спектре C1s также присутствуют компоненты аморфного углерода с энергией связи 284,7 эВ.

Результаты анализа количества и вида присутствия магния в поверхностном слое приведены на рис. 1. Из полученных фотоэлектронных спектров и результатов разложения линий спектра Mg2s и Al2s на компоненты установлено, что в поверхностном слое капель материала в результате совместного окисления жидких металлов, имеющих близкое сродство реакций с кислородом, образуется поверхностная оксидная пленка, содержащая оба этих металла.

Поиск соответствия химического состояния атомов образца и энергии связи полученных

Name	Pos.	Area	% Area	
Mg2s	89,05	2198,4	91,650	$MgAl_2O_4$
Mg2s	87,56	200,4	8,350	Mg

а)

Name	Pos.	Area	% Area	
Al2s	119,26	741,6	84,766	$MgAl_2O_4$
Al2s	116,87	133,3	15,234	Al

б)

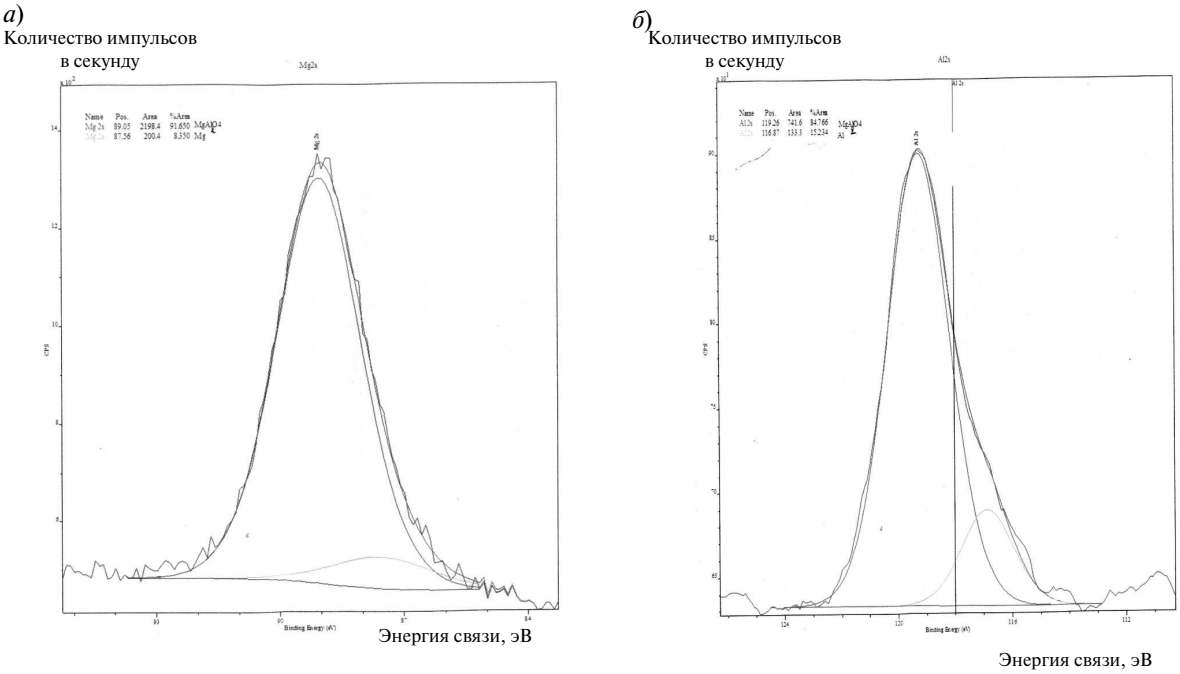


Рис. 1. Соотношение частоты импульсов и энергии связи атомов магния и алюминия и результаты анализа в поверхностном слое образца сплава Al-Mg по данным фотоэлектронной спектроскопии (*а* — магний, *б* — алюминий)

компонент разложения экспериментальных спектров производился по известным эталонным энергиям связи [8, 9]. Анализ позволил сделать вывод, что наиболее вероятное оксидное соединение в поверхностной пленке — алюминат магния $MgAl_2O_4$. Разница в энергиях связи для основных компонент экспериментальных спектров и эталонов [10, 11] в этом случае не превышает 0,3 эВ. Если интерпретировать полученные данные таким образом, что в поверхностной пленке содержится смесь оксидов алюминий и магния, то в этом случае разница в энергиях связи для экспериментальных спектров и эталонов составляет не менее 1 эВ.

Поскольку метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии поверхностно-чувствителен, то наличие $MgAl_2O_4$ идентифицируется в поверхностном слое толщиной не более 100 Å. Возможно, что более глубокие слои содержат индивидуальные оксиды магния и алюминия.

По величине площади графика (см. рис. 1, *а*) определено, что в данном образце поверхностный слой содержит 91,65 ат. % магния в виде алюмината магния, а остальные 8,35 ат. % — в виде свободного металла. На рис. 1, *б* приведены результаты анализа алюминия: 84,77 ат. % находятся в структуре алюмината магния и 15,23 ат. % составляет свободный металл.

Наличие на рис. 1 компонент разложения, соответствующих металлическим магнию и алюминию, свидетельствует о том, что слой оксида не превышает глубину выхода фотоэлектронов, ионизированных с 2*s*-оболочки магния и алюминия. Поскольку в результатах анализа проявляется металлическая компонента, расположенная под оксидным слоем, то соотношение глубины выхода фотоэлектронов и количеств оксидной и металлической фаз позволяет оценить толщину поверхностной пленки — она не более 5 нм.

В случае, когда поверхность представляет собой рыхлую пористую структуру, оценка толщины оксидного слоя увеличится не менее, чем в два раза.

Результаты анализов других образцов показали, что при отклонении соотношения атомных количеств магния и алюминия в поверхностном

слое от стехиометрического для алюмината (1:2) образуется двухфазная структура из алюмината магния с избытком оксида алюминия или оксида магния.

Химическую активность порошков алюминия, магния и их сплавов по отношению к дистиллированной воде, а также растворам HCl и NaOH определяли исходя из объема выделившегося водорода по стандартной методике согласно ГОСТ 6058–73.

На рис. 2 приведена зависимость от времени приведенного количества водорода, выделившегося при взаимодействии алюминия, магния и их сплавов с дистиллированной водой при 40 °С. Активное выделение водорода в первые минуты эксперимента связано с наличием дефектов в поверхностной пленке частиц порошка. После их «залечивания» гидроксидом алюминия, образовавшимся по реакции (1)

$$2Al + 6H_2O = 2Al(OH)_3 + 3H_2\uparrow, \qquad (1)$$

порошок алюминия практически переставал взаимодействовать с водой.

У порошков сплавов поверхностная пленка неплотная, ее проницаемость для воды увеличивается пропорционально росту содержания магния. Поэтому в экспериментах со сплавами выделение водорода при увеличении содержания в них магния (табл.1) происходит более интенсивно.

В экспериментах при температурах 50 и 60 °С получены аналогичные по форме графики, но количество выделившегося водорода больше. Например, к 45-й минуте при 60 °С выделилось на порядок больше водорода, чем при 40 °С.

На рис. 3, *а* приведена зависимость количества выделившегося водорода от времени взаимодействия исследованных порошков с раствором соляной кислоты ($pH = 3$) при температуре 40 °С. Из-за значительно большего объема выделяющегося водорода, чем в экспериментах с водой, появилась необходимость на порядок увеличить масштаб по оси ординат.

Экспериментально было установлено, что порошок алюминия АСД-1 в сравнении с порошками, содержащими магний (см. табл. 1), в незначительной степени растворялся в соляной кислоте. Возможно, это связано с образованием плотной нерастворимой в соляной кислоте поверхностной пленки, компонентами которой являются основные соли $Al_2Cl_n(OH)_{6-n}$. [10]. Остальные порошки — магний и его сплавы с алюминием, имеющие пористую поверхностную пленку, содержащую растворимый в HCl оксид магния, — активно реагировали с раствором соляной кислоты. С увеличением содержания магния увеличивалась интенсивность выделения водорода.

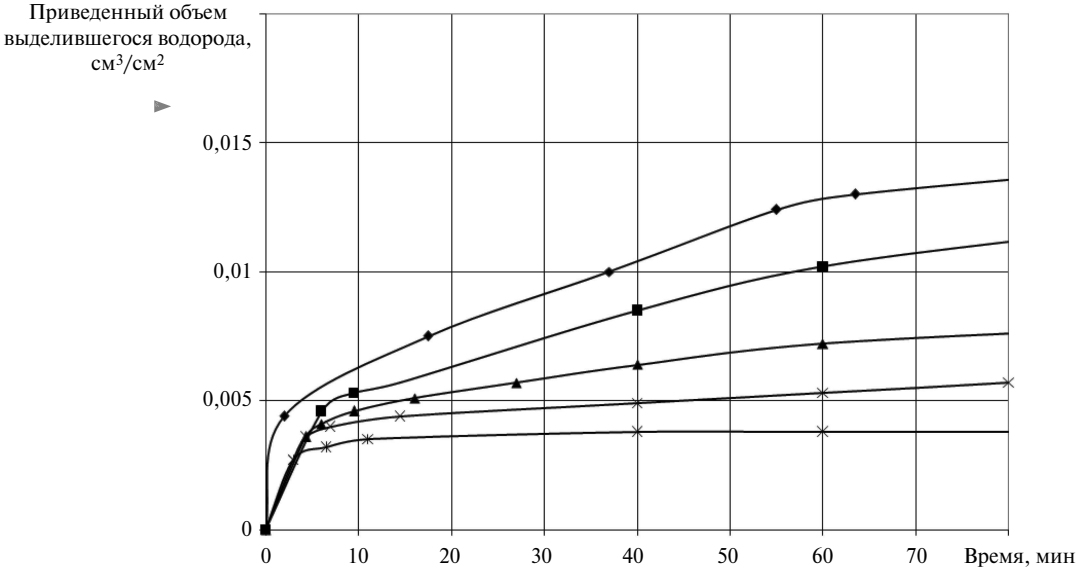


Рис. 2. Зависимость выделившегося приведенного объема водорода от времени взаимодействия с дистиллированной водой (pH = 7) при 40 °С (— ПМ-5; — АМД-50; — АМД-30; —АМД-10; —АСД-1)

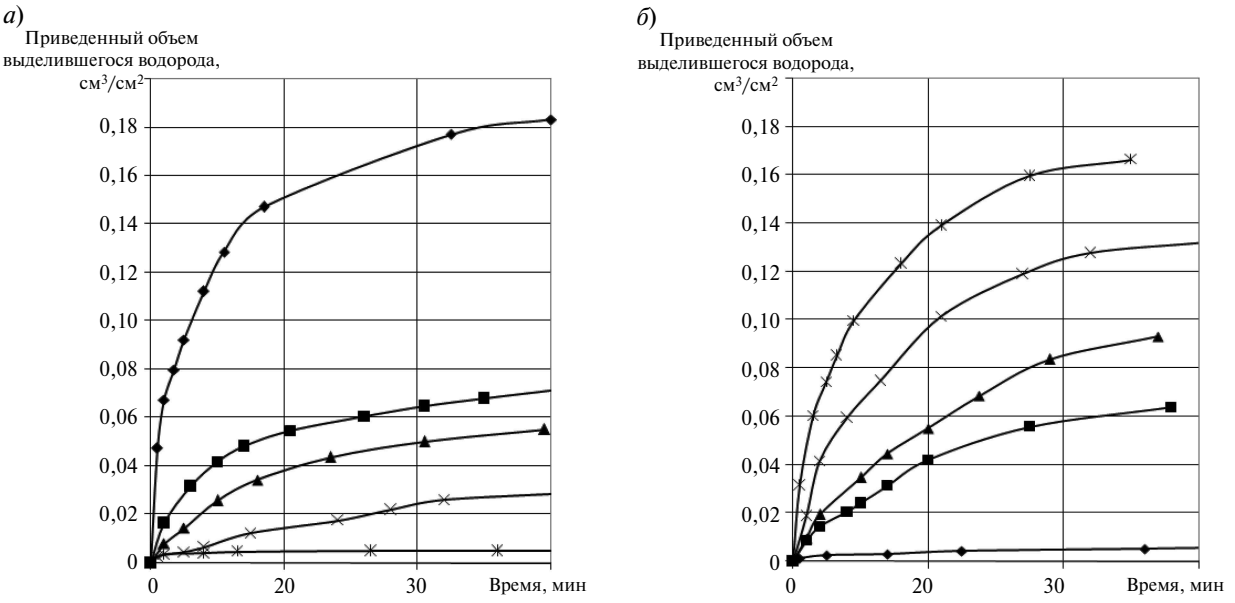


Рис. 3. Зависимость приведенного объема выделившегося водорода от времени взаимодействия порошков при 40 °С с растворами: HCl, $pH = 3$, и NaOH, $pH = 11$, *б* (—◆— ПМ-5; —■— АМД-50; —▲— АМД-30; —✳— АМД-10; —✳— АСД-1)

На рис. 3, *б* приведена аналогичная зависимость при взаимодействии с раствором NaOH ($pH = 11$). Магний с ним практически не реагирует. Порошки из чистого алюминия и его сплавов с магнием активно взаимодействует с этим раствором. Происходит растворение содержащихся в поверхностных пленках Al_2O_3 и $Al(OH)_3$, открываются ювенильные поверхности металла и начинают реагировать с гидроксильными ионами.

На рис. 4 приведены зависимости объема водорода, выделившегося в воде, щелочной и кислых средах, от содержания магния в сплаве Al–Mg на 45-й минуте эксперимента при 40 °С.

Рис. 4. Зависимость приведенного объема выделившегося водорода в различных средах от содержания магния в сплаве на 45-й минуте эксперимента (—◆— HCl; —■— NaOH; —▲— H_2O)

Время выбрано произвольно, так как предполагается, что к этому моменту процесс установился. Получены две симметрично расположенные кривые, пересекающиеся вблизи точки с равным содержанием алюминия и магния. Это означает, что схема взаимодействия алюминия и магния с растворами одинакова: разрушается защитная поверхностная пленка, открывается доступ реагента к металлу и в сплаве реагирует одна из составляющих.

Поверхностная пленка из алюмината магния $MgAl_2O_4$ на сплаве Al–Mg имеет плотную бездефектную пленку, предохраняющую на воздухе металл от окисления. Однако она не защищает порошки от коррозии в кислотной и щелочной средах, т. к. даже в связанном виде MgO растворяется в кислоте, а Al_2O_3 — в щелочи.

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 4, показывают, что максимальное количество водорода можно получить, используя «чистые» металлы. Применение сплавов не ускоряет выделение водорода.

Для практического применения в генераторах водорода и нагревательных элементах более эффективен порошок алюминия с раствором NaOH. Этот материал производится в большом масштабе, удобно транспортируется, хорошо хранится и легко дозируется [1].

Отработанный раствор NaOH, обогащенный алюминатом натрия, может быть использован при производстве специальных сортов гидроксидов алюминия, применяемых, например, для получения оксидов алюминия для катализаторов и других целей.

Выводы

Поверхностная пленка частиц порошка, полученного распылением алюминиево-магниевого сплава, значительно обогащена магнием, являющимся поверхностно-активным металлом в комбинации с алюминием.

В результате совместного окисления алюминия и магния при распылении в оксидной пленке порошка образуется алюминат магния.

Результаты опытов с порошками из алюминия, магния и их сплавов в растворах соляной кислоты и гидроксида натрия показали, что решающую роль в процессе играют свойства оксидов металлов, образующих поверхностную пленку.

Для получения водорода можно использовать взаимодействие магния с раствором HCl или алюминия с раствором NaOH; во втором случае производительность будет выше.

Использование порошков сплавов Al–Mg для генерации водорода как в кислой, так и в щелочной среде нецелесообразно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гопиенко, В.Г.** Металлические порошки алюминия, магния, титана и кремния. Потребительские свойства и области применения [Текст] / В.Г. Гопиенко, С.Ю. Петрович, В.П. Черепанов и др.; под ред. чл.-кор. РАН проф. А.И. Рудского.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 356 с.

2. **Гопиенко, В.Г.** Химические тепло- и газообразующие смеси на основе порошков алюминия, магния и их сплавов [Текст] / В.Г. Гопиенко, В.П. Черепанов, А.Н. Зотикова, Л.В. Куряшкин // Цветные металлы.— 2000. № 1.— С. 65–68.

3. **Колбенев, И.Л.** Исследование кинетики выделения водорода при взаимодействии порошков некоторых алюминиевых сплавов с водой [Текст] / И.Л. Колбенев, Н.Ф. Волынец, Р.Г. Сармурзина [и др.] // Сб. тр. ВАМИ: Совершенствование технологии производства кремния и порошков.— Л., 1986.— С. 61–65.

4. **Мондольфо, Л.Ф.** Структура и свойства алюминиевых сплавов [Текст] / Л.Ф. Мондольфо.— М.: Металлургия, 1979.— 640 с.

5. **Щербаков, В.К.** Структура и формирование оксидной и металлической фаз распыленных алюминиевых порошков [Текст] / В.К. Щербаков, А.К. Локенбах, Н.А. Запорина // Сб. тр. ВАМИ: Совершенствование технологии литья, обработки алюминия, производства кремния и порошков.— СПб., 1992.— С. 52–59.

6. **Young-Won, K.** Surface Oxides in PM Aluminum Alloys [Текст] / K. Young-Won, W.M. Griffith, F.H. Froes // Journal of metals.— 1985. № 8.— P. 27–31.

7. http://www.rusnanonet.ru/equipment/ntmdt_nanofab25_es

8. **Moulder, J.F.** Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy [Текст] / J.F. Moulder, W.F. Stickle, P.E. Sobol, K.D. Bomben.— Physical Electronics, Eden Prairie, MN.— 1995.— 262 s.

9. http://srdata.nist.gov/xps

10. **Haycock, D.E.** The Electronic Structure of Magnesium Dialuminium Tetraoxide (Spinel) Using X-Ray Emission and X-ray Photoelectron Spectroscopiec. [Текст] / D.E. Haycock, C.J. Nicholls, D.S. Urch, M.J. Webber, G.J. Wiech.— J. Chem. Soc. Dalton Trans.— 1978. Vol. 12.— P. 1785.

11. **Strohmeier B.R.** Magnesium Aluminate ($MgAl_2O_4$) by XPS. Surf. Sci. Spectra. 1994. № 3.— P. 121.

12. **Патент США 4944933.** Preparation of basic aluminium halides.— C01F/56/— 1990.

БАЙМАКОВ Александр Юрьевич — *кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул. д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 294-42-98
lmpa2010@mail.ru

ПЕТРОВИЧ Сергей Юрьевич — *заведующий лабораторией Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул. д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 294-42-98
lmpa2010@mail.ru

ЛИПИН Вадим Аполлонович — *доктор технических наук, профессор кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул. д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-77-67
vadim.lipin@km.ru

ШАХМИН Александр Львович — *кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул. д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-77-67
alshakhmin@yandex.ru

ЕРЕМИН Евгений Александрович — *студент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул. д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 294-42-98
lmpa2010@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 537.523: 66.088

И.В. Кретушева, М.В. Мишин, А.С.Александров

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

I.B. Kretusheva, M.V. Mishin, S.E. Alexandrov

SOME REGULARITIES OF FORMATION OF SILICON DIOXIDE NANOPARTICLES IN LOW TEMPERATURE ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA

Исследуются некоторые закономерности образования наночастиц диоксида кремния в низкотемпературной плазме атмосферного давления. Показано, что применение перфорированных электродов, покрытых диэлектриком, позволяет использовать чистый аргон для получения тлеющего высокочастотного разряда (α-режим разряда). Основные закономерности синтеза наночастиц близки при использовании гелия и аргона в качестве плазмообразующего газа. Вероятно, что образование наночастиц происходит в области горения разряда, а их агломерация — в области реактора, расположенной далее по потоку.

ВЧ-РАЗРЯД АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ. НАНОЧАСТИЦЫ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ.

In this paper some regularities of formation of silicon oxide nanoparticles from TEOS in atmospheric pressure low temperature plasma are experimentally studied. It was demonstrated that the use of perforated flat electrodes covered with dielectric allows to use of pure argon to get glow RF discharge (α-region of discharge). The main regularities of nanoparticle synthesis process are common for helium and argon atmosphere. It is very probably that formation of nanoparticles occurs in the plasma generation region and formation of their agglomerates happens in the afterglow region.

RF-DISCHARGE ATMOSPHERIC PRESSURE. SILICON DIOXIDE NANOPARTICLES.

Процессы химического осаждения из газовой фазы относятся к универсальным нанотехнологиям XXI века, так как позволяют решать широкий круг задач как по формированию слоев (в том числе нанометровой толщины) различных материалов на разнообразных подложках, так и получать уникальные наноматериалы, такие, как нанопорошки, нанотрубки, нановолокна и т. д. Суть процесса состоит в получении продукта в результате химических реакций между реагентами, подаваемыми в газо(паро)образном состоянии в реакционный объем. Характер и вид получаемого продукта определяется условиями осуществления реакций, конфигурацией аппаратуры и методом активации этих реакций.

Как показывают полученные нами экспериментальные результаты по активированию процесса химического осаждения из газовой фазы наночастиц, целесообразно использовать низкотемпературную плазму, создаваемую с помощью электрического разряда в реакционной газовой среде. Именно благодаря пространственной локализации плазмы удается получать наночастицы с высокой однородностью их распределения по размерам. Большинство плазмохимических процессов, применяемых для синтеза наночастиц, осуществляются при пониженных давлениях, когда легко реализовать тлеющий высокочастотный (ВЧ) разряд, характеризующийся высокой степенью неравновесности. Однако такие процессы требуют использования дорогостоящей вакуумной аппаратуры, а кроме того, характеризуются низкой степенью использования реагентов из-за высоких скоростей газовых потоков. В этой связи для активации гомогенного синтеза наночастиц более эффективно исполь-

зование низкотемпературной плазмы, создаваемой с помощью ВЧ разрядов в реакционной газовой фазе при атмосферном давлении [1–3]. Действительно, можно ожидать более высоких скоростей гомогенных реакций только за счет на три порядка более высоких парциальных давлений реагентов. Кроме того, возможность уменьшения пространственной области плазмы в этом случае обеспечит и лучшую однородность распределения синтезируемых наночастиц по размеру.

На предварительном этапе исследований [4] ВЧ разряд (13,56 МГц) инициировался между двумя плоскими электродами диаметром 21 мм, выполненными из металлической сетки (нержавеющая сталь) с прозрачностью 99 %, через которые пропускалась реакционная смесь. Расстояние между электродами варьировалось в пределах 1–3 мм. При такой конфигурации электродов тлеющий разряд (α-режим разряда) удавалось получить только при использовании гелия в качестве плазмообразующего газа. Даже небольшие добавки аргона (более 3 %) приводили к переходу разряда в γ-режим, при котором разряд локализовался в виде дуги.

Интерес представлял экспериментальный поиск конструкций электродов и условий процесса, при которых обеспечивался устойчивый α-режим горения разряда в среде существенно более дешевого аргона, а также предварительная проверка возможности синтеза в таких условиях наночастиц диоксида кремния.

Экспериментальная часть

На рис. 1 представлено схематичное изображение реактора, использованного в работе. ВЧ-разряд инициировался между двумя плоскопараллельными электродами *1* диаметром 50 мм, выполненными из перфорированных алюминиевых пластин с коэффициентом прозрачности 62 %. Электроды глубоко анодировались для создания диэлектрического барьера, снижающего вероятность перехода разряда из α-режима в γ-режим. Расстояние между электродами составляло 1,5–2 мм. К одному из электродов подводилась ВЧ-мощность на рабочей частоте 13,56 МГц, в то время как второй был заземлен. С целью согласования нагрузки использовался вариометр, позволявший компенсировать реактивную составляющую полного тока в ВЧ-тракте. Ток разряда измерялся с помощью токового трансформатора, напряжение на разрядном промежутке — с помощью емкостного делителя. Мощность варьировалась в пределах 5–20 Вт. В качестве плазмообразующих газов использовались как аргон, так и гелий. Общий расход газа варьировался в пределах 2,5–8 л/мин. В качестве реагента для получения наночастиц диоксида кремния применялся тетраэтоксисилан (ТЭОС), пары которого подавались в реактор газом-носителем (аргон или гелий) с расходом 0,05–0,2 л/мин. Для поддержания неизменной линейной скорости газа для варьирования концентрации реагента в потоке к газу-носителю добавлялся разбавитель с расходом 0,2–0,35 л/мин.

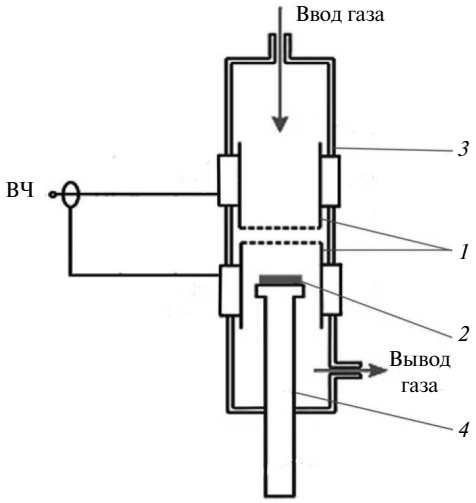


Рис. 1. Схематичное изображение реактора для получения наноматериалов в плазме атмосферного давления:
1 — электроды; *2* — подложка; *3* — кварцевый корпус; *4* — пьедестал

Для определения степени превращения реагента применялась ИК Фурье-спектрометрия (ФСМ-1201, оснащенный кюветой с длиной оптического пути 4,8 м). Анализировалась газовая смесь на выходе из реактора. Степень превращения оценивалась сопоставлением парциальных давлений реагента при прохождении его через область горения разряда и при отсутствии плазмы.

Образующиеся продукты осаждались на кремниевые подложки, размещаемые ниже по потоку на специальном пьедестале на расстоянии 25–65 мм от нижнего электрода. Размерные

характеристики продуктов определялись с помощью сканирующей электронной микроскопии (Supra 55 VP с использованием детектора вторичных электронов).

Результаты

Результаты предварительных экспериментов показали, что создание диэлектрического барьера на поверхности электродов действительно обеспечивает возможность получения α-режима горения разряда не только в чистом гелии, но и в его смесях с аргоном, а также в чистом аргоне. Однако следует отметить, что на стадии инициирования разряда требовалось введение в аргон добавки гелия (около 50 %). После стабилизации разряда подачу дополнительного гелия прекращали. Кроме того, установлен верхний предел расхода аргона, приблизительно равный 8 л/мин, выше которого разряд переходил в γ-режим.

ИК Фурье-спектроскопия синтезированного наноматериала показала, что его состав соответствует диоксиду кремния. Полученные осадки состояли как из отдельных наночастиц со средним размером 80–150 нм, так и из кластеров с размерами до 2,6 мкм, образованных этими наночастцами. Интересно отметить, что по сравнению с выполненными нами ранее исследованиями образования наночастиц в сходных условиях [4], но при использовании гелия в качестве плазмообразующего газа и электродов в виде металлических сеток с прозрачностью около 99 % средний размер полученных наночастиц увеличился приблизительно на порядок.

Варьирование технологических параметров процесса приводило к значительным изменениям структуры образующихся осадков. На рис. 2, *а*, *б* представлены изображения поверхности осадков, синтезированных при различных парциальных давлениях реагентов. Средний размер наночастиц оставался практически неизменным и составлял 100–130 нм. Однако достаточно отчетливо проявляется тенденция к формированию наночастицами кластерных образований, средний размер которых постепенно увеличивается от 1 мкм при парциальном давлении реагента 3 Па до 1,6–2 мкм при 8,8 Па, а поверхностная плотность при этом приблизительно удваивается. Неизменность среднего размера синтезированных наночастиц, вероятнее всего, свидетельствует о том, что они преимущественно синтезируются в области плазмы, а их размер определяется средним временем пребывания реагентов в этой области. На рис. 2, *в* представлен график зависимости степени превращения реагента от его парциального давления во входящем газовом потоке. Видно, что увеличение парциального давления в 3 раза сопровождается двукратным уменьшением степени превращения реагента.

Увеличение расхода плазмообразующего газа (и, соответственно, уменьшение времени пребывания реагента в зоне плазмы) при неизменной концентрации реагента в газовом потоке также приводило к снижению степени превращения ТЕОС (рис. 3).

Повышение ВЧ мощности, поглощаемой в разряде, с 8 до 20 Вт сопровождалось увеличением степени превращения реагента с 15 до 45 %. Интересно отметить, что синтез нанопорошков из ТЕОС в реакторе с сетчатыми электродами в сходных условиях, но при использовании гелия в качестве плазмообразующего газа характеризовался значительно более высоким значением степени превращения реагента, достигавшим 80 % [4].

Что касается формирования кластеров из наночастиц, то, вероятнее всего, этот процесс преимущественно происходит в газовой фазе при перемещении наночастиц вдоль реактора после области плазмы. На это указывают результаты, приведенные на рис. 4, иллюстрирующие влияние на поверхностную структуру осаждаемого материала расстояния от нижнего электрода до подложки. Представленные данные отчетливо свидетельствуют о том, что увеличение указанного расстояния, а следовательно, и времени совместного пребывания в газовом потоке наночастиц, синтезированных в области плазмы, приводит к увеличению средних размеров кластеров от 0,6–0,7 мкм при расстоянии от нижнего электрода до подложки 25 мм (рис. 4, *а*) до 1,2–1,4 — при 45 мм (рис. 4, *б*), при этом их поверхностная плотность увеличивается.

Предположение о преимущественном образовании кластеров во время движения наночастиц после области плазмы подтверждается и характером влияния расхода плазмообразующего газа на размерные характеристики наноструктур образующихся на поверхности подложки (рис. 5). На этом рисунке изображения осадков, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии, показывают, что увеличение расхода аргона приводит к умень-

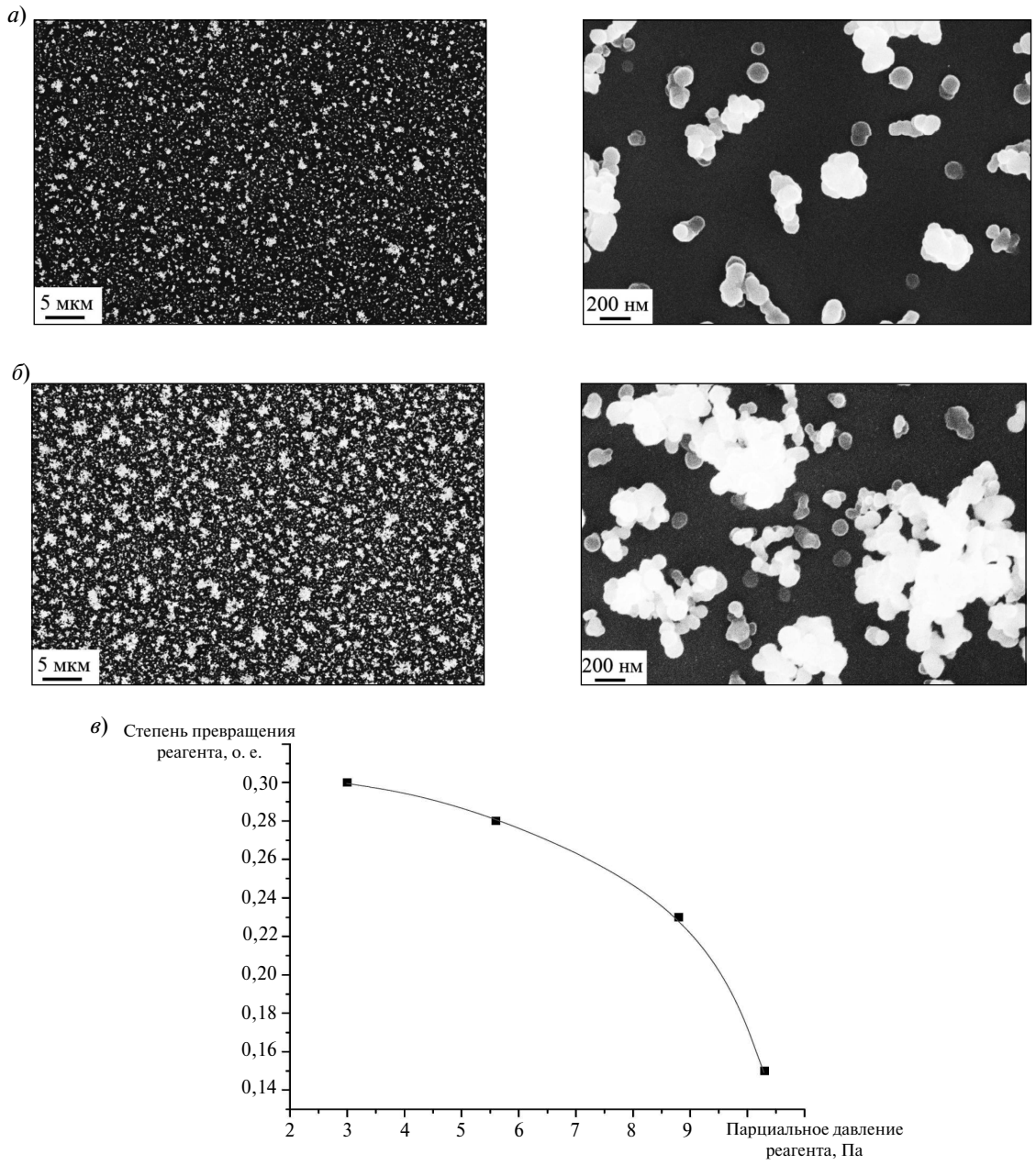


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности образцов, полученных при разных парциальных давлениях реагента в системе (условия получения: расход плазмообразующего аргона — 4000 мл/мин; расстояние от нижнего электрода до пьедестала — 45 мм; парциальное давление реагента 3 (*а*) и 8,8 (*б*) Па) и график зависимости степени превращения реагента от его парциального давления при пропускании реагента через зону горения разряда (*в*)

шению размеров до 200 нм практически к их исчезновению кластеров. Интересно отметить, что при этом размер наночастиц остается приблизительно постоянным.

В связи с тем, что обнаружились существенные различия в размере наночастиц, полученных в среде аргона как плазмообразующего газа и при использовании нового типа электродов, по сравнению с выполненными ранее исследованиями, при которых синтез осуществлялся в атмосфере гелия между сетчатыми электродами, было интересно выяснить их причину.

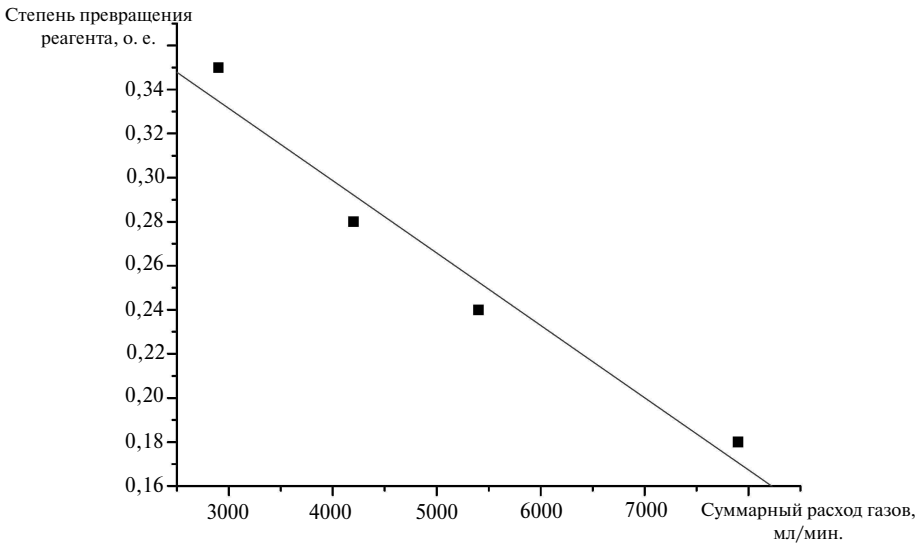


Рис. 3. График зависимости степени превращения реагента (ТЕОС) от линейной скорости газа

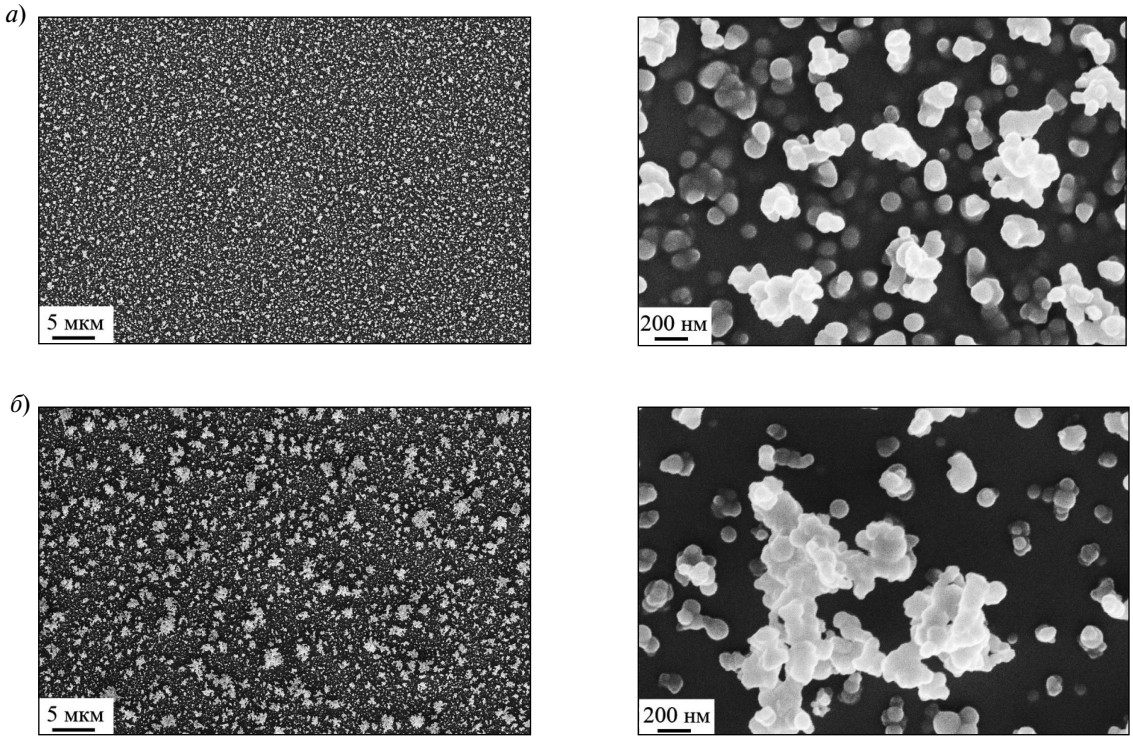


Рис. 4. СЭМ-изображения поверхности образцов, полученных при разных расстояниях от области горения разряда до подложки (условия получения: расход плазмообразующего аргона — 4000 мл/мин; расход аргона через испаритель + разбавитель — 400 мл/мин; расстояние от нижнего электрода до подложки — 25(*а*) и 45 (*б*) мм

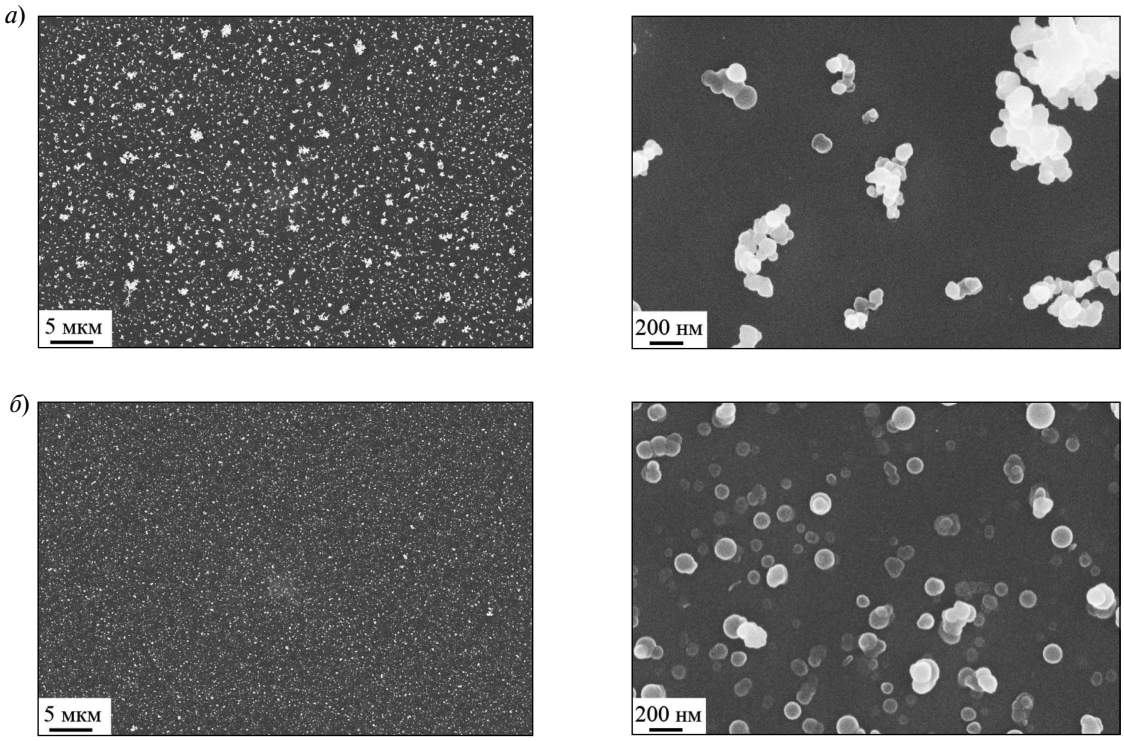


Рис. 5. СЭМ-изображения поверхности образцов, полученных при различных расходах плазмообразующего газа (парциальное давление реагента в обоих случаях одинаково — 3,5 Па; расход плазмообразующего аргона — 2500 (*а*) и 5000 (*б*) мл/мин

Для решения этой задачи провели эксперименты, в которых аргон был заменен на чистый гелий в качестве плазмообразующего газа. На рис. 6 — изображения полученных осадков. Результаты свидетельствуют о том, что синтезированные в гелии наночастицы имеют приблизительно такой же размер (120–130 нм), как и в среде аргона. Кроме того, они также могут образовывать кластеры или агломераты, но имеющие явно выраженную форму цепочек. Оценка степени превращения реагента методом просвечивающей ИК Фурье-спектрометрии показала, что при переходе от аргона к гелию для одинаковых условий в пределах погрешности эксперимента она не изменялась.

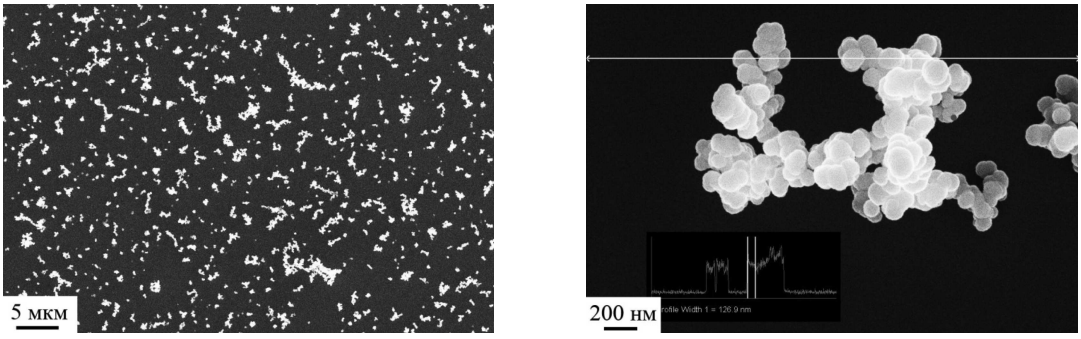


Рис. 6. СЭМ-изображения поверхности образцов, полученных в чистом гелии (без добавления аргона). Условия получения: расход плазмообразующего гелия — 4000 мл/мин; расход гелия через испаритель + разбавитель — 400 мл/мин, расстояние от нижнего электрода до подложки — 45мм

Полученные данные свидетельствуют о том, что основной причиной различий являются конструктивные особенности использованных электродов. Применение в качестве электродов двух анодированных пластин с отверстиями, вероятнее всего, приводит к возникновению значительных турбуленций потока в области между ними, что сопровождается увеличением среднего времени пребывания частиц и, соответственно, увеличением их размеров по сравнению со случаем, когда использовались сетчатые электроды с высоким коэффициентом прозрачности. Возможно, именно этим объясняется и сходство всех результатов, полученных при использовании как гелия, так и аргона в качестве плазмообразующих газов.

Использование электродов, покрытых электроизолирующим слоем, позволяет получать тлеющие разряды (α-режим горения разряда) в среде существенно более дешевого аргона. Закономерности синтеза наночастиц диоксида кремния из ТЕОС при использовании как гелия, так и аргона отличаются незначительно. Наиболее вероятно, получение наночастиц с размерами в интервале 100–150 нм происходит в области горения разряда, однако по мере перемещения потоком газов за пределами области плазмы они агломерируют. Размер образующихся агломератов преимущественно определяется временем одновременного пребывания наночастиц в движущемся потоке газа. Увеличение размера наночастиц от 8–16 нм в случае использования сетчатых электродов до 100–150 нм при использовании электродов с отверстиями, вероятнее всего, обусловлено увеличением времени пребывания реакционной газовой среды в области горения разряда вследствие турбуленции потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chen, C.** Continuous generation of TiO2 nanoparticles by an atmospheric pressure plasma-enhanced process [Текст] / C. Chen,H. Bai, H.M. Chein // Aerosol Science and Technology.— 2007. Vol. 41.— P. 1018–1028.

2. **Zhu, H.** RF plasma synthesis of YBa2Cu3O7–x powders [Текст] / H. Zhu, Y.C. Lau, E. Pfender // Journal of Superconductivity.— 1990. Vol. 3, № 2.— P. 171–175.

3. **Barankin, M.D.** Synthesis of nanoparticles in an atmospheric pressure glow discharge [текст] / M.D. Barankin, Y. Creyghton, A. Schmidt // Journal of Nanoparticle Research. 2006.— Vol. 8.— P. 511–517.

4. **Alexandrov, S.E.** Formation of Fractal Structures from Silicon Dioxide Nanoparticles Synthesized by RF Atmospheric Pressure Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition / S.E. Alexandrov, I.V Kretusheva, M.V. Mishin, G.M. Yasenovets J // Nanosci. Nanotechnol.— 2011. Vol. 11.— P. 7969–7973.

КРЕТУШЕВА Ирина Васильевна — *аспирант кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, младший научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории СПбГПУ.*
195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-61-71
kresch86@mail.ru

МИШИН Максим Валерьевич — *кандидат физико-математических наук, доцент докторант кафедры физико-химии и технологии микросистемной техник иинститута металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
тел. (812) 552-61-71
maximvmishin@gmail.com, mmishin@spbstu.ru

АЛЕКСАНДРОВ Сергей Евгеньевич — *доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-химии и технологии микросистемной техники института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
тел. (812) 297-38-33
salexandrov@spbstu.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 678.6

В.Л. Мазурин

ПОЛИУРЕТАН КАК КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ XXI ВЕКА

V.L. Mazurin

POLYURETHANE — STRUCTURAL MATERIAL OF XXI CENTURY

В статье рассмотрены вопросы становления полиуретана конструкционным материалом, его основные физико-механические и химические свойства, а также основные сферы применения деталей из полиуретана.

ПОЛИУРЕТАН. СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ. ХИМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ.

In article consider questions of becoming polyutherane as structural material, its physical and chemical properties, also the main applications of polyurethane's details.

POLYURETHANE. APPLICATION. PHYSICAL PROPERTIES. PAINTS COATINGS. CHEMICAL RESISTANCE.

Полиуретановые эластомеры, образующие широкий класс высокомолекулярных каучукоподобных соединений, были впервые синтезированы 13 ноября 1937 года Отто Байером и его сотрудниками в Германии [1]. Полиуретаны относятся к синтетическим полимерным материалам, в основной цепи которых содержатся уретановые группы. Полиуретаны могут быть вязкими жидкостями или твердыми веществами. Их твердость изменяется по Шору от 15 единиц по шкале А до 97 единиц по шкале Д (твердые пластики).

Начиная с 50-х годов прошлого века в передовых промышленно развитых странах мира резины во многих технических приложениях стали вытесняться полиуретанами, имеющими важные конструктивные, технологические и эксплуатационные преимущества, хотя полиуретаны в 1,5–3 раза дороже резин. Отставание валового выпуска полиуретанов объясняемое не только конъюнктурными и технологическими ограничениями, но и отсутствием методик проектирования, в перспективе будет неуклонно преодолеваться.

На сегодняшний день согласно [2] каждый год перерабатывается более 3 миллионов тонн полиуретановых материалов. Перспективность полиуретанов для современной промышленности обусловлена тем, что их свойства существенно дополняют возможности использования других эластомеров, каучуков, резин и пр. [3–5]. По своим конструкционным и технологическим возможностям полиуретаны — наиболее универсальный полимерный материал.

Наиболее широко в качестве конструкционных материалов используются линейные (не сшитые) полиуретаны, которым и посвящена данная статья. Линейные полиуретаны в своей основе имеют блочную структуру макромолекул, которая состоит из жестких и гибких сегментов с сильно изогнутыми молекулярными цепями.

Полиуретаны характеризуются высокими физико-механическими свойствами, имеют большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокую прочность, высокое сопротивление раздиру, маслобензостойкость, кислотостойкость, рабочий температурный интервал от –35 °С до +75 °С.

Стоимость полиуретана, как уже отмечено, несколько выше, чем резины. Однако совокупный экономический эффект применения полиуретана вместо резины оказывается высоким как благодаря большей долговечности изделий, так и за счет применения энергосберегающих технологий синтеза компонентов и их промышленной переработки.

Полиуретан как конструкционный материал применяется для изготовления деталей машин, работающих главным образом на деформацию сжатия и сдвига. Полиуретан воспринимает и другие виды деформации, проявляя при этом весьма ценные конструкционные свойства. Так, для деформации растяжения полиуретана характерны большие удлинения, достигающие 500 %. Однако трудности прочного и надежного крепления полиуретанового массива, работающего на растяжение с другими деталями, и большая чувствительность растянутого полиуретана к концентраторам напряжений (царапины, надрывы) сильно ограничивают его применение.

Сравнение потребительских свойств полиуретанов и резин на основе различных каучуков представлено в таблице.

При работе на изгиб полиуретановые детали отличаются высокой эластичностью и практически не могут нести нагрузку. Аналогичные причины ограничивают применение полиуретановых деталей, работающих на кручение. Полиуретан практически не может сопротивляться срезу. Во всех перечисленных случаях ограниченного применения полиуретана детали из него предназначаются не для восприятия и передачи силовых нагрузок, а для выполнения роли эластичных кинематических связей.

Нагрузки, действующие на детали машин в процессе работы, можно разделить на статические и динамические.

Динамические нагрузки, действующие на детали машин, различают по характеру и времени действия. По характеру они могут быть стационарными и нестационарными, знакопеременными и постоянными по знаку, периодическими и непериодическими. По времени действия динамические нагрузки бывают медленно изменяющимися (когда время изменения нагрузки близко ко времени протекания релаксационных процессов в материале) и ударными. В практике более распространены промежуточные по времени нагрузки, скорость изменения которых находится между медленно изменяющимися и ударными.

Потребительские свойства эластомеров

Свойства	Оценка свойств					
	Каучуки					Полиуретаны
	Натуральный	Бутадиен-стирольный	Нитрильный	Неопреновый	Бутиловый	
Предел прочности на растяжение, МПа:						
ненаполненный эластомер	Выше 21	Ниже 7	Ниже 7	Выше 21	18	28
наполненный эластомер	Выше 21	Выше 14	Выше 14	Выше 21	18	46
Сопротивление раздиру	Х	С	С	С/Х	С	И
Абразивная стойкость	0	Х	0	Х	С/Х	И
Старение в атмосфере	П	П	С	О	Х/О	0
Стойкость к окислению кислородом	Х	Х	С	Х	Х	О
Стойкость к углеводородам:						
алифатическим	П	П	О	Х	П	О
ароматическим	П	П	С	С	П	Х
Стойкость к нефти и маслам	П	П	О	Х	П	О

Обозначено: И — исключительно, О — отлично, Х — хорошо, С — средне, П — плохо.

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 подвергаться [6, 7] значительным относительным деформациям, достигающим в отдельных случаях 100 %, но с полным восстановлением геометрической формы и размеров, если прикладываемая нагрузка носит статический, медленно изменяющейся характер или если динамическая нагрузка имеет разовый характер, когда динамические нагружения следуют друг за другом с известными перерывами по времени.

Важнейшим критерием, определяющим работоспособность деталей машин из полиуретана, является температура полиуретанового массива. Для полиуретановых деталей, испытывающих воздействие статических и разовых ударных нагрузок, когда температура полиуретана не превышает температуру других деталей, она не относится к физическим величинам, определяющим работоспособность детали.

У полиуретановых деталей, подверженных динамическому нагружению, вследствие действия внутреннего сопротивления происходит нагрев полиуретана и постоянное повышение температуры детали. С повышением температуры в полиуретане протекают необратимые физико-химические процессы [8–10], ухудшающие его эластичность, причем протекают они тем быстрее, чем выше температура нагрева полиуретана. Тепловое разрушение полиуретана приводит к выходу детали из строя.

Отличительной особенностью этого процесса является тот факт, что нагрев полиуретана может происходить при деформациях, в несколько раз меньше допустимых с точки зрения их полной обратимости, сохранения механических свойств и полного восстановления геометрической формы и размеров. Из этого следует, что при расчете полиуретановых деталей, работающих при динамической нагрузке, необходимо исходить не только из условия недопустимости деформаций, вызывающих разрушение или потерю механических свойств, но также и из условия недопустимости такого нагрева полиуретана, который вызывал бы тепловое разрушение. Нагрев полиуретана определяется прежде всего скоростью и величиной деформации полиуретанового массива. Поэтому на совокупность этих параметров, определяющих режим деформации детали при динамическом нагружении, должны быть наложены ограничения, сохраняющие работоспособность детали.

Таким образом, расчет полиуретановых деталей, работающих при статических и разовых динамических нагрузках, существенно отличается от расчета деталей, работающих при динамических нагрузках. Расчет деталей в последнем случае существенно усложняется тем, что нагрев их зависит не только от режима деформации и свойств полиуретана, но и от условий охлаждения деталей, которые, в свою очередь, определяются их конструкцией, температурой и движением окружающей среды. Учесть аналитическим путем все многообразие факторов, влияющих на тепловой режим работы детали, очень трудно. Поэтому при конструировании и расчетах полиуретановых деталей, работающих под действием динамических нагрузок, важнейшая роль принадлежит эксперименту, как наиболее достоверному способу оценки работоспособности деталей в конкретных условиях.

В зависимости от вида нагружения выделим две основные группы деталей машин из полиуретана.

Первая группа — упругие детали, испытывающие воздействие статических и разовых ударных нагрузок:

прокладки и уплотнения;

универсальные шарниры в рычажных системах;

упругие буферы — ограничители перемещений.

Вторая группа — упругие и износостойкие детали, испытывающие воздействие динамических нагрузок:

валы для полиграфии и целлюлозно-бумажного производства;

массивные шины, опорные колеса, бегунки;

амортизаторы.

Помимо представленных двух групп, можно выделить дополнительно еще две группы, в которых полиуретан при работе не испытывает каких-либо значительных деформаций и где используются его специфические свойства.

Третья группа включает в себя детали машин, где используется высокая стойкость полиуретана к абразивному изнашиванию (в частности, в водяных насосах большой производительности для футеровки внутренних поверхностей). Диэлектрические свойства и высокая текучесть полиуретана нужны для герметизации электрических машин, работающих в воде. Химическая стойкость полиуретана используется при изготовления уплотнительных манжет и подшипников скольжения, работающих в агрессивных средах.

Четвертая группа деталей машин — та, где полиуретан применяют в виде защитного покрытия. В последние десятилетия полиуретан стали широко использовать в производстве лакокрасочных материалов (ЛКМ). На сегодняшний день ЛКМ на основе полиуретана — в числе самых бурно развивающихся, востребованных и в наибольшей степени соответствующих современным представлениям о промышленных лакокрасочных материалах. Лаки и краски на основе полиуретана имеют очень разнообразные свойства (твердые и мягкие, эластичные и жесткие и т. д.). Полиуретаны обладают превосходной адгезией к древесине, пластику, металлу и т. д. В последние годы стали широко использовать водоразбавимые ЛКМ на основе полиуретана, которые полностью удовлетворяют высоким современным экологическим требованиям. К известным преимуществам полиуретановых покрытий (длинный срок службы) следует также добавить:

защиту от агрессивных сред (топливо, масло, чистящие средства);

защиту от погодных эффектов (пожелтение, поверхностное растрескивание);

защиту от царапин;

свободный выбор цвета;

низкую склонность к загрязнению.

Еще одним важным достоинством, которое объясняет широкое распространение полиуретановых покрытий, в частности в автомобилестроении, является высокая гибкость покрытия.

Существуют три основных области применения полиуретановых покрытий:

1) защитное покрытие пластмасс, в частности деталей интерьера автомобиля, колпаков колес, бамперов и т. д.;

2) защита бетона от диффузии кислых газов, что напрямую увеличивает его долговечность и погодоустойчивость;

3) антикоррозионная защита стальных конструкций.

Фактически полиуретановые покрытия могут применяться независимо от влажности и в холодные месяцы года, что предоставляет огромные экономические преимущества перед традиционными защитными материалами.

В инженерной практике используются полиуретаны твердостью 90–98 ShA, работающие постоянно в режиме скольжения. Это уплотнения и подшипники скольжения применяемые в химической промышленности, где полиуретаны используются ввиду их высокой химической стойкости к агрессивным средам (кислоты, щелочи и т. д).

При работе в уплотнениях и подшипниках скольжения в качестве контртела выступает шлифованная стальная поверхность.

Все основные свойства эластомеров зависят от окружающей среды, которая может вызывать в материале физические или механические изменения. Физические изменения в большинстве случаев (хотя и не везде) обратимы. Так, полиуретаны набухают в некоторых жидкостях. Однако, если образцы удалить из этой среды и высушить, они восстановят свои первоначальные размеры. Это не всегда верно в отношении других эластомеров или пластмасс, так как они могут содержать пластификаторы, которые вымываются данной жидкостью, и тогда происходит необратимая усадка материала.

В полиуретанах, подвергающихся действию высоких температур, могут происходить два процесса: временное ухудшение свойств, вызванное общим ослаблением связей, и деструкция — разрушение материала, при котором происходит необратимое изменение химической структуры.

В первом случае все свойства меняются в одинаковой степени. Для большинства полиуретанов [11] показатели при 45–55 °С составляют лишь 50 % от величин при комнатной температуре. Аналогичные зависимости получены для прочностных свойств и истираемости. Так что неизбежен вывод о нецелесообразности эксплуатации полиуретанов при температуре выше 70 °С. Это свойственно не только полиуретанам

и наблюдается в той или иной степени у всех синтетических каучуков.

Второй процесс — деструкция. Деструкция — это процесс разрушения материала, который обычно протекает при температуре 70–80 °С и начинается у полиуретанов с разрушения вторичных химических связей (поперечные сшивки).

При низких температурах полиуретановые эластомеры изменяют свои свойства, но при этом деструкции не происходит, и изменения носят обратимый характер. Главное изменение заключается в увеличении модуля упругости при температуре ниже 0 °С, что сопровождается увеличением показателей твердости, сопротивления разрыву, жесткости при кручении и снижением эластичности. Две из перечисленных величин могут ограничить использование полиуретана при низких температурах — это уменьшение эластичности и увеличение жесткости.

Нижний предел температуры, при котором возможно использование ПУ в качестве конструкционного материала, находится в пределах минус 20–30 °С. Температура стеклования полиуретана (температура, при которой материал становится хрупким) находится в пределах минус 30–40 °С. Она зависит от упорядоченности молекулярной структуры полиуретана. Хотя все полиуретаны становятся значительно более жесткими при низких температурах, хрупкость обычно не проявляется, пока температура не снизится до минус 40–60 °С.

При длительной эксплуатации полиуретановой конструкции в ней происходят необратимые процессы, приводящие в конечном итоге к изменению физико-механических характеристик материала. Такие процессы [12] обусловлены циклической усталостью и старением полиуретана. При этом циклическую усталость связывают с воздействием механических факторов, а понятие «старение» охватывает все — механические, физические и химические — действующие факторы, которые вызывают необратимые изменения свойств материала.

Старению полиуретана [13] способствует длительное соприкосновение с атмосферным воздухом. Под действием кислорода и влаги воздуха, особенно при более высокой температуре и под воздействием солнечных лучей, на поверхности полиуретана образуется сетка мелких трещин, полиуретаны меняют цвет на более темный, теряют свою эластичность и прочность. Интенсивность старения полиуретана зависит главным образом от состава полиуретана и уменьшается при добавлении в него противостарителей.

Полиуретан как эластомерный материал обладает большим внутренним трением, которое широко используется в амортизаторах, для гашения колебаний.

В дальнейшем для изучения вопросов деформативности полиуретанов необходимо спроектировать и изготовить измерительное устройство для замера статической деформации полиуретановых амортизаторов различной твердости и геометрии, работающих на сдвиг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **German Patent DRP 728981.** A process for the production of polyurethanes and polyureas / O. Bayer, W. Siefken, H. Rinke, L. Orthner, H. Schild.— 13.11.1937.

2. **Wieczorrek, W.** Poliyrethane coatings — new developments and applications [Текст] / W. Wieczorrek // Journal of elastomers and plastics.— 1986. Vol. 18.

3. **Райт, П.** Полиуретановые эластомеры [Текст] / П. Райт, А. Камминг. — М. : Химия, 1973. — 304 с.

4. **Зуев, Ю.С.** Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях [Текст] / Ю.С. Зуев, Т.Г. Дегтева. — М.: Химия, 1986. — 262 с.

5. **Яковлев, С.Н.** Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана [Текст] / С.Н. Яковлев. — СПб.: Реноме, 2013. — 176 с.: ил.

6. **Огибалов, Л.М.** Конструкционные материалы [Текст] / Л.М. Огибалов. — М.: Изд-во МГУ, 1972. — 322 с.

7. **Zhang, H.** Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers [Текст] / H. Zhang // Journal of Elastomers and Plastics.— 2008. Vol. 40.— P. 161–177.

8. **Гуль, В.Е.** Структура и механические свойства полимеров [Текст] / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнов. — М.: Высшая школа, 1972. — 320 с.

9. **Регель, В.Р.** Разрушение и усталость полимеров [Текст] / В.Р. Регель, А.М. Лексовский, А.И. Слуцкер, В.П. Тамуж // Механика полимеров. — Vol. 172, № 4. — С. 597–611.

10. **Datta, J.** Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers [Текст] /

J. Datta // Journal of Elastomers and Plastics.— 2010. Vol. 42.— P. 117–127.

11. **Maity, M.** Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent [Текст] / M. Maity // Journal of Elastomers and Plastics.— 2001. Vol. 33.— P. 211–224.

12. **Rek. V.** Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters [Текст] / V. Rek // Journal of Elastomers and Plastics.— 2003. Vol. 35.— P. 311–323.

13. **Rek, V.** Kinetic Parameters Estimation for Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers [Текст] / V. Rek // Journal of Elastomers and Plastics.— 2006. Vol. 38.— P. 105–118.

МАЗУРИН Валерий Леонидович — *аспирант кафедры автоматизации технологических комплексов и процессов (сектор прикладной механики) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 440-07-62

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.873.12

В.А. Лебедев, С.А. Соколов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕКОСОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА

V.A. Lebedev, S.A. Sokolov

THE STUDY SKEWS OF METAL CONSTRUCTIONS OF CRANES OVERHEAD TYPE

Рассмотрено влияние процесса перекоса металлической конструкции крана на долговечность его узлов, приведены схемы и результаты эксперимента по замеру значений перекоса на козловом кране с частотной системой управления, выполнены расчеты параметров перекоса для экспериментального крана, сделан сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов расчета, по результатам сравнительного анализа сформулированы выводы.

КОЗЛОВОЙ КРАН. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ. ПЕРЕКОС. СИЛА ПЕРЕКОСА. ПЕРЕКОСНАЯ ЖЕСТКОСТЬ.

The article considers influence of process skewing metal construction crane on durability of its units, are given schemes and experimental results on the measurement of the values of skewing on the gantry crane with frequency control system, are made the calculations of skewing's parameters for the experimental crane, are made a comparative analysis of the experimental data and the calculation results, by results of the comparative analysis are stated conclusions.

GANTRY CRANE. DURABILITY. SKEWING. FORCE OF SKEWING. STIFFNESS OF SKEWING.

При проектировании и эксплуатации кранов мостового типа существует проблема долговечности металлоконструкций, которая связана с развитием усталостного повреждения металла в результате действия переменных во времени напряжений [1]. Наиболее подвержены усталостным повреждениям узлы примыкания пролетных и концевых балок для мостовых кранов и узлы соединения пролетных балок и опорных стоек для козловых кранов.

В значительной степени нагруженность указанных узлов связана с перекосом конструкции крана при эксплуатации, т. е. забеганием концевых балок относительно друг друга. Перекос δ складывается из свободного перекоса $\delta_{св}$ и перекоса $\delta_{деф}$, который связан с упругими деформациями металлической конструкции крана. Свободный перекос — это поворот крана за счет зазоров между боковыми поверхностями рельсов и реборд колеса или направляющих роликов. При свободном перекосе не происходит изменения напряжено-деформированного состояния металлоконструкции крана. Силу, вызывающую деформацию металлоконструкции крана при перекосе, называют силой перекоса. При этом со стороны рельсов на реборды колес (ролики) действуют реакции.

Существуют методики по определению перекосов; некоторые из них имеют экспериментальные подтверждения.

Основные недостатки существующих методик:

методики основываются на исследованиях кранов с релейно-контакторной системой управления механизма передвижения, между тем наиболее распространены приводы с частотной системой управления;

методики дают оценку максимальных параметров, а для анализа долговечности конструкций необходимы оценки цикличности перекосов.

По характеру управления приводами (разгон и торможение) релейно-контакторная и частотная системы управления имеют ряд существенных различий. Эти различия ставят под сомнение применимость существующих методик к кранам с частотной системой управления.

Для исследования характера образования перекоса металлоконструкций крана при частотной системе управления был проведен эксперимент на козловом кране.

Козловой кран, на котором производилось измерение параметров перекоса, имел следующие параметры (рис. 1): m_{crane} = 4030 кг — масса козлового крана; m_{hoist} = 110 кг — масса одной тали; m_{load} = 2000 кг — масса испытательного груза; Q = 2000 кг — грузоподъемность одной тали; V_{crane} = 0,17 м/с — скорость передвижения козлового крана; l_{span} = 12000 мм — пролет козлового крана; b = 4763 мм — база козлового крана; Δ_{crane} = 19 мм — зазор между ребордами колеса и боковыми поверхностями рельса; b_h = 51 мм — ширина головки рельса Р24 ГОСТ 4121–96 [6].

В качестве измерительных приборов использовались два лазерных дальномера GLM50 фирмы Bosch с функцией непрерывного измерения и допускаемой погрешностью измерения не более 1 мм. Измерения положения опор проводились синхронно при разных положениях талей с грузом и без груза, с реверсивным движением крана. В местах тупиковых упоров крана устанавливались лазерные дальномеры *1*, *2*, которые производили замер расстояний соответственно x_1 и x_2 до фиксированных точек опор (рис. 2, а). Результаты замеров лазерных дальномеров *1* и *2* фиксировались с помощью камер *1* и *2*. Время съемки камер *1* и *2* синхронизировалось с помощью программного обеспечения компьютера, к которому они подключались. Результатом проведенного эксперимента стали замеры зазоров между ребордами колес и рельсом перед началом движения и во время остановок, а также замеры расстояний от лазерных дальномеров до фиксированных точек опор при движении крана в прямом и обратном направлениях, при положениях *1*, *2* и *3* талей с грузом и без него (см. рис. 2, *а*).

После обработки результатов эксперимента были получены графики образования перекоса (забегания опор относительно друг друга) при различных положениях талей с грузом и без него для прямого (от 0 до 59 с) и обратного (от 60 до 119 с) движений козлового крана (рис. 3).

Перед началом движения козлового крана без груза и при положении 1 талей (см. рис. 2, *а*) были произведены замеры между ребордами колес и рельсом. По результатам замеров было определено, что козловой кран повернут против часовой стрелки до касания реборд (см. рис. 2, *б*).

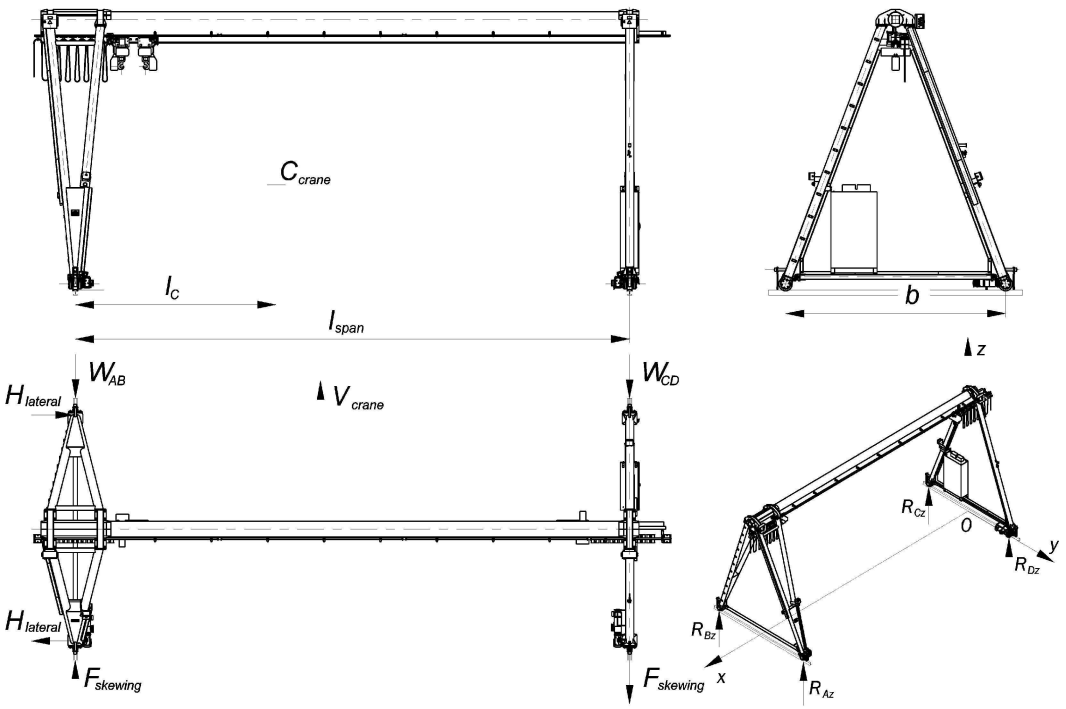


Рис. 1. Общий вид козлового крана с расчетной схемой нагрузок при перекосе

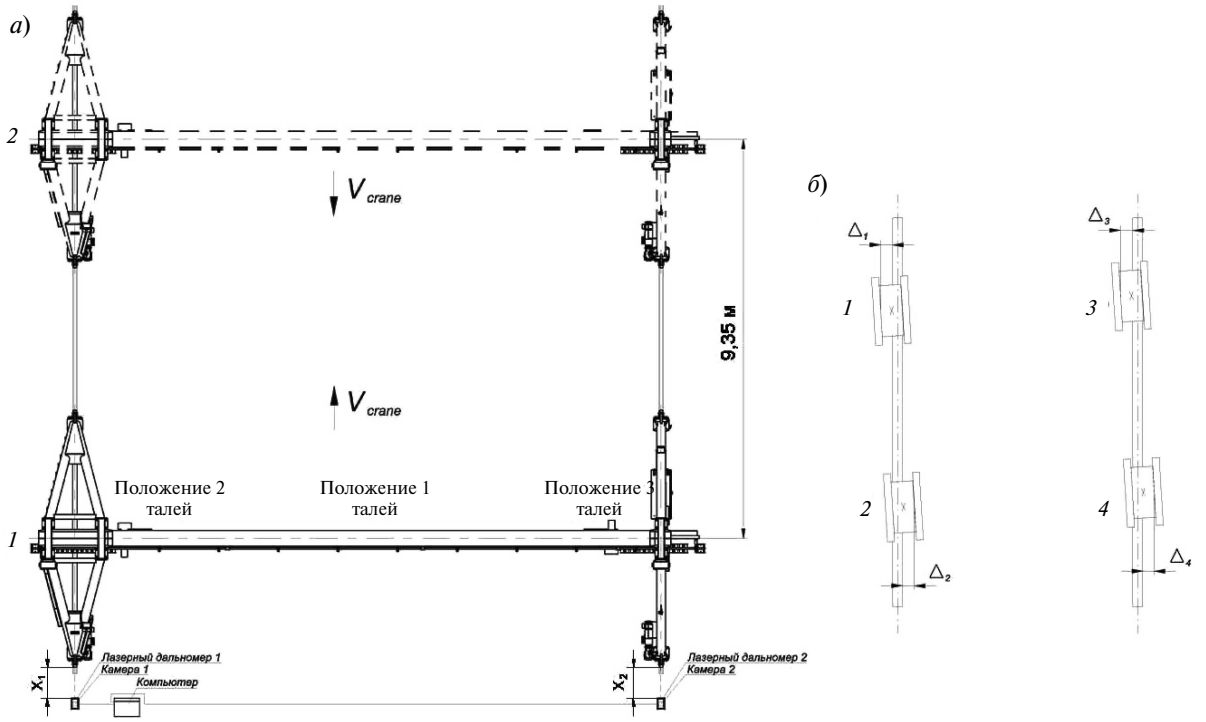


Рис. 2. Схема замера перекоса (*а*) и замера зазоров между ребордами колес и рельсов (*б*)

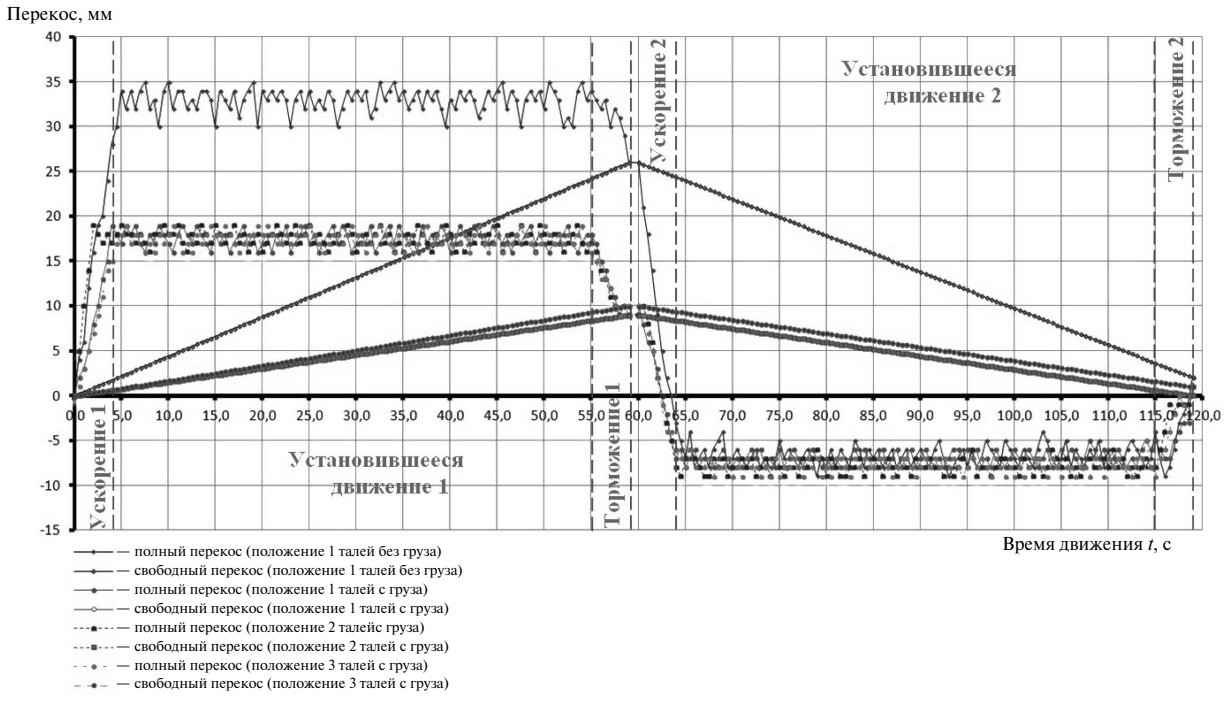


Рис. 3. График образования перекоса при различных положениях талей с грузом и без груза

После остановки крана на 59-й секунде при прямом движении были произведены повторные замеры между ребордами колес и рельсом (рис. 3). Результаты замеров показали, что козловой кран повернут по часовой стрелке до касания реборд. Замеры зазоров между ребордами колес и рельсом при других движениях козлового крана показали аналогичные результаты. Поскольку свободный перекос во время движения крана выбирался полностью, а замеры между ребордами колес и боковыми поверхностями рельсов можно было произвести только после остановки крана, то было сделано допущение, что свободный перекос изменяется по линейному закону (см. рис. 3).

Исходя из этого предположения и того, что полный перекос — это сумма свободного перекоса и перекоса, вызывающего деформацию металлоконструкции крана, были получены графики образования перекоса, вызывающего деформацию металлоконструкции крана (рис. 4).

Экспериментальные данные были сопоставлены с результатами расчета параметров перекоса, выполненного по известным методикам [3–5].

Согласно методике [3] расчет силы перекоса при установившемся движении определяется по формуле (см. рис. 1)

$$F_{skewing} = 0,7W_{AB} - 0,5W_{CD}, \quad (1)$$

где $W_{AB} = 0,8$ кН — приведенное суммарное сопротивление к жестким опорам; $W_{CD} = 0,4$ кН — приведенное суммарное сопротивление к гибким опорам (см. рис. 1).

Боковую силу согласно [3] определим по формуле

$$H_{later} = \frac{(W_{AB} - 0,8W_{CD})l_{span}}{1,8b - 0,06l_{span}}. \quad (2)$$

Деформация металлоконструкции при перекосе (забегание концевых балок относительно друг друга) связана с силой перекоса через соотношение

$$\delta_{деф} = \frac{F_{skewing}}{C_{skewing}}, \quad (3)$$

где $F_{skewing}$ — сила перекоса; $C_{skewing}$ — перекосная жесткость металлоконструкции крана.

По результатам расчетов модели металлоконструкции козлового крана, выполненных с помощью программы SCAD Office 11.3, перекосная жесткость составила $C_{skewing} = 0,04$ кН/мм.

Из формул (1)–(3) были получены параметры перекоса: $H_{later} = 0,8$ кН; $F_{skewing} = 0,4$ кН; $\delta_{деф} = 9$ мм.

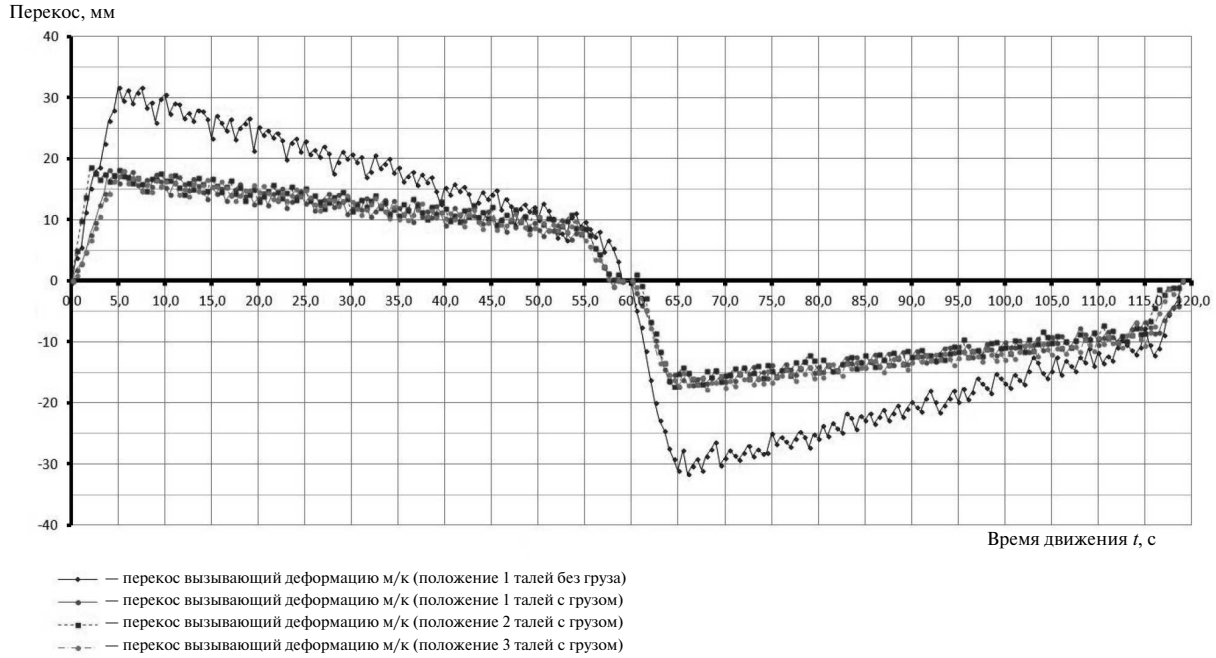


Рис. 4. График образования перекоса, вызывающего деформацию металлоконструкции крана, при различных положениях талей с грузом и без груза

Согласно методике [4] боковая сила, действующая на колесо, вычисляется так:

$$H_{later} = \lambda N_{\max}, \quad (4)$$

где $\lambda = 0{,}068$ — коэффициент зависимости осевой силы, действующей на ходовое колесо при $\frac{l}{b} = 2{,}5$; $N_{\max} = 26{,}7$ кН — максимальная нагрузка на колесо (положение 2 талей с грузом). Из формул (3), (4) были получены параметры перекоса: $H_{later} = 1{,}8$ кН; $F_{skewing} = 0{,}7$ кН; $\delta_{\text{деф}} = 17$ мм.

Согласно методике [5] боковая сила, действующая на ролик, определяется по зависимости

$$H_{later} = v f m g, \quad (5)$$

где $mg = 38{,}3$ кН — сила тяжести козлового крана; f — коэффициент трения качения колеса; v — коэффициент, учитывающий возможное поперечное смещение колеса.

Коэффициент трения качения колеса определяется по формуле

$$f = 0{,}3\left[1 - e^{(-250\alpha)}\right], \quad (6)$$

где a — угол перекоса в радианах. Угол перекоса определяется по формуле

$$\alpha = \alpha_g + \alpha_w + \alpha_t, \quad (7)$$

где α_g — перекос в результате зазоров между ребордами колеса и боковыми поверхностями рельса; α_w — перекос в результате износа; $\alpha_t = 0{,}001$ рад — перекос, вызванный неточностью изготовления и монтажа.

Перекос в результате зазоров между ребордами колеса и боковыми поверхностями рельса определяется по формуле

$$\alpha_g = \frac{\Delta_{crane}}{b}. \quad (8)$$

Перекос в результате износа вычисляется так:

$$\alpha_w = 0{,}1\frac{b_h}{b}. \quad (9)$$

Коэффициент, учитывающий возможное поперечное смещения колеса, для случая раздельного привода и фиксированных в поперечном направлении колес определяется по формуле

$$v = 1 - \frac{d_1 + d_2}{nh}, \quad (10)$$

где $d_1 = 0$ — расстояние от 1-й колесной пары до точки контакта реборды и рельса; $d_2 = 4763$ мм — расстояние от 2-й колесной пары до точки контакта реборды и рельса; $n = 4$ — количество колес козлового крана; h — расстояние между мгновенным полюсом поворота и плоскостью симметрии рельса.

Расстояние между мгновенным полюсом поворота и направляющим устройством (реборда) для случая раздельного привода и фиксированных в поперечном направлении колес определяется по формуле

$$h = \frac{p\mu\mu' l_{span}^2 + d_1^2 + d_2^2}{d_1 + d_2}, \quad (11)$$

где $p = 2$ — количество пар колес; $\mu = x/l$; x — координата положения центра масс крана с грузом; $\mu' = 1 - \mu$. При испытаниях тележка находилась в положениях, соответствующих μ равному 0,3; 0,5 и 0,7.

Из формул (3), (5)–(11) были получены параметры перекоса:

для положения талей у жесткой опоры — $H_{later} = 8$ кН; $F_{skewing} = 3{,}1$ кН; $\delta_{\text{деф}} = 69$ мм;

для положения талей в центре пролета — $H_{later} = 8$ кН; $F_{skewing} = 3{,}1$ кН; $\delta_{\text{деф}} = 69$ мм.

Полученные результаты эксперимента и расчетов представлены в таблице.

Значения перекосов

Положение талей (см. рис. 2, *а*)	Величина перекосов, мм, по разным методикам			
	СТО	FEM	EN 13001	Экспериментальные данные (макс. значения)
1 без груза	–	–	–	32
1 с грузом	–	–	69	18
2 с грузом	9	17	69	19
3 с грузом	–	–	69	18

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

результаты расчетов по разным методикам существенно различаются;

значение свободного перекоса больше, чем перекоса, вызванного деформацией металлоконструкции;

в зависимости от характера образования свободного перекоса наилучшее приближение дает расчет по методике [4] (если предположить, что свободный перекос происходит во время всего движения) или по методике [3] (если предположить, что свободный перекос происходит в момент разгона);

существующие методики не учитывают такие факторы, оказывающие существенное влияние на параметры перекоса, как скорость передвижения, схема подключения частотных преобразователей, разность диаметров колес и др.;

эксперимент показал, что за один цикл работы крана с частотной системой управления происходит один цикл нагружения перекосом.

Таким образом, для учета перекоса в расчете долговечности металлоконструкции крана на стадии проектирования необходимо разработать методику, которая позволит определять параметры перекоса при частотной системе управления. Она должна учитывать особенности конструкции и настройки частотных систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соколов, С.А.** Металлические конструкции подъемно-транспортных машин [Текст] / С.А. Соколов.— СПб.: Политехника, 2005.— 423 с.

2. Исследование крановых конструкций [Текст] / ВНИИПТМаш. — Труды ВНИИПТМаш. Вып. 11(64).— М., 1965.

3. **СТО 24.09-5821-01–93**. Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций [Текст] / Стандарт ВНИИПТМаш-Подъемтранстехника.— 1993.— 135 с.

4. Rules for the design of hoisting appliances [Текст] / Federation Europeenne de la manutention. Section I: FEM 1.001.— 3RD Edition.— 1998. 10.

5. Crane safety— General design— Part 2: Load effects [Текст] / EN 13001–2:2004 (E).

6. **ГОСТ 4121–96.** Рельсы крановые. Технические условия [Текст].— М.: Изд-во стандартов, 1996.

ЛЕБЕДЕВ Владимир Александрович — *аспирант кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812)552-84-01
vladimir_aleksandrovich_lebedev@mail.ru

СОКОЛОВ Сергей Алексеевич — *доктор технических наук, профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812)552-84-01

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 629.1.032.001

Р.В. Русинов, А.Д. Элизов, Р.Ю. Добрецов

ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ СТЕПЕНЬЮ РАСШИРЕНИЯ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ

R.V. Rusinov, A.D. Elizov, R.Yu. Dobretsov

INTERNAL COMBUSTION ENGINES WITH INCREASED EXPANSION RATIO OF EXPLOSIVE MIXTURE

Рассмотрен вопрос расчета параметров теплового цикла поршневых двигателей внутреннего сгорания с повышенной степенью расширения горючей смеси. Предложен метод расчета, в котором минимизировано применение «эмпирических» коэффициентов. Предлагаемый метод расчета допускает оперативный анализ различных комбинаций действующих факторов и поиск их оптимальных соотношений.

ДИЗЕЛЬ. РАБОЧИЙ ЦИКЛ. ЭКОНОМИЧНОСТЬ.

Examined an issue involving the work cycle parameters calculation of the internal combustion engine with increased expansion ratio. Suggested a calculation method in which the number of empirical coefficients was minimized. Suggested method admits a line analysis of different combinations of acting factors and their optimal ratio search.

DIESEL ENGINE. WORK CYCLE. FUEL EFFICIENCY.

В бензиновых поршневых двигателях внутреннего сгорания автомобилей на процесс сгорания горючей смеси отводится не более 4,5–5,0 мс, и при сравнительно малой скорости распространения в камерах сгорания фронта пламени, инициируемого свечами зажигания, часть горючей смеси догорает за пределами рабочих цилиндров, т. е. в выпускном коллекторе.

Данное обстоятельство, ведущее к непроизводительной потере энергии горючей смеси, наглядно иллюстрирует, в частности, пример ранее широко используемых поршневых авиационных двигателей типа ВК-101, когда при отключении одной из двух одновременно работающих в каждом отдельном цилиндре свечей зажигания заметно снижалось число оборотов их коленчатых валов из-за менее полного сгорания топлива именно в цилиндрах.

В связи с подобным обстоятельством и с учетом достаточно значительной тепловой энергии выпускных газов вообще естественно возникает вопрос о возможном выигрыше в части мощности и экономичности двигателей за счет увеличения хода поршня при расширении горючей смеси по отношению к ходу поршня в процессе сжатия, кстати говоря, ограниченного степенью сжатия, исключающей детонацию горючей смеси.

Соотносительное увеличение рабочего хода поршня первоначально представлялось возможным конструктивно осуществить за счет дополнения обычного кривошипно-шатунного механизма двигателя специальным кулисным приспособлением [1]. Однако реально было найдено и более простое решение, связанное с перепуском воздуха в процессе его предварительного сжатия при общем равенстве ходов сжатия и расширения.

Организованный подобным образом, т. е. с перепуском воздуха, тепловой цикл, названный циклом Аткинсона, и был реализован в виде конкретного двигателя, в частности со степенью сжатия $\varepsilon_c = 12{,}2$ и степенью расширения $\varepsilon_p = 17{,}6$ [2], показавший при испытании весьма хорошую экономичность (против ее обычного значения для традиционных конструкций двигателей с равными степенями процессов сжатия и расширения), оцененную в 12–15 %.

В связи с последним представляет несомненный интерес расчетный анализ показателей тепловых циклов с различными соотношениями степеней расширения и сжатия с целью оценки перспектив дальнейшего повышения экономичности двигателей, а также их мощности.

Такой анализ достаточно просто осуществить на базе математической модели теплового цикла, в которой рассматривается только часть тепловой энергии топлива Q_1 (рис. 1), затрачиваемая только на производство механической энергии без учета чисто тепловых потерь [3, 4] и численно определяемая индикаторным КПД η_i двигателя.

Общее количество теплоты, вводимое в цикл, равно $Q_0 = Q_{\text{тн}} / (1 + \alpha L_0)$, где $Q_{\text{тн}}$ — низшая теплотворная способность топлива; α — коэффициент избытка воздуха при сгорании топлива; L_0 — теоретическое количество воздуха, потребное для сгорания единицы массы топлива, $Q_1 = \eta_i Q_0$.

На рис. 1 представлена подобная математическая модель цикла Аткинсона (по сути — индикаторная диаграмма), имитирующая процессы сжатия и расширения (линии «a–c» и «z–b_0»), роста давления при подводе теплоты Q_1 («c–z»), потерю теплоты Q_2 с выпускными газами и обратным перепуском сжимаемого рабочего тела («a_0–a»).

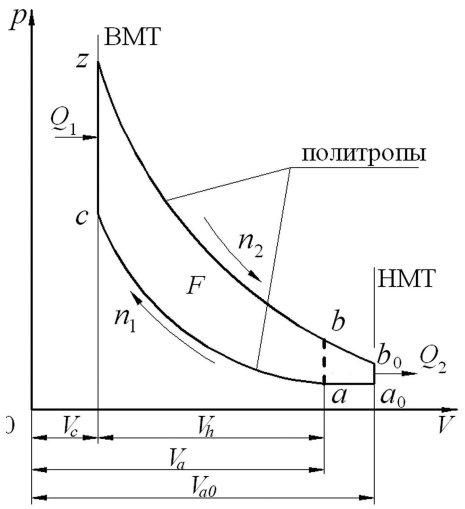


Рис. 1. Математическая модель теплового цикла с повышенной степенью расширения:

p — давление; V — объем цилиндра; V_c — объем камеры сгорания; V_h — рабочий объем; V_a — полный объем при сжатии рабочего тела; V_{a0} — полный объем на конец расширения; n_1 и n_2 — показатели политроп сжатия и расширения; F — общая площадь индикаторной диаграммы по контуру $a_0czb_0a_0$; ВМТ — верхняя мертвая точка положения поршня; НМТ — нижняя мертвая точка; Q_1 — вводимая в цикл тепловая энергия; Q_2 — тепловая энергия, теряемая с выпускными газами

При задании начальных условий — давления в начале процесса сжатия $p_a = p_0$ и температуры T_a, показателей политроп процессов сжатия n_1 и расширения n_2, теплоемкости рабочего тела при постоянном объеме c_v, степени сжатия ε_{c} и расширения ε_{p} — основные параметры в узловых точках c, z, b_0 математической модели равны: $p_c = p_a \varepsilon_{\text{c}}^{n_1}$; $T_c = T_a \varepsilon_{\text{c}}^{n_1 - 1}$; $T_z = Q_1 / c_v + T_c$; $\lambda = p_z / p_c = T_z / T_c$; $p_z = \lambda p_c$; $p_b = p_z / \varepsilon_c^{n_2}$; $T_{b0} = T_z / \varepsilon_p^{n_2 - 1}$.

Среднее индикаторное давление p_i теплового цикла определяется отношением площади F индикаторной диаграммы (см. рис. 1), деленной на рабочий объем цилиндра $V_h = V_a - V_c$.

Площадь индикаторной диаграммы F представляется площадью F_1 под кривой «$z - b_0$» за вычетом площади F_2 под кривой «$c - a$» и площади F_3 под линией «$a - a_0$», т. е. $F = F_1 - F_2 - F_3$.

По уравнению политропы для любой точки кривой «$z - b_0$» верно $p_x V_x^{n_2} = p_z V_z^{n_2}$, или $p_x = p_z \left(V_z / V_x \right)^{n_2}$, откуда дифференциал площади

$$dF_1 = p_x dV_x = p_z \left(V_z / V_x \right)^{n_2} dV_x,$$

а интеграл соответственно равен

$$F_1 = p_z V_z^{n_2} \int_{b_0}^{z=c} V_x^{-n_2} dV_x = \frac{p_z V_z^{n_2}}{-n_2 + 1} V_x^{-n_2+1} \Big|_{b_0}^{z=c} =$$

$$= \frac{\lambda p_c V_z^{n_2}}{n_2 - 1} \left(\frac{1}{V_{b_0}^{n_2 - 1}} - \frac{1}{V_z^{n_2 - 1}} \right) =$$

$$= \frac{\lambda p_c V_c}{n_2 - 1} \left(\frac{V_z^{n_2 - 1}}{V_z^{n_2 - 1}} - \frac{V_z^{n_2 - 1}}{V_{b_0}^{n_2 - 1}} \right) = \frac{\lambda p_c V_c}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{\text{p}}^{n_2 - 1}} \right).$$

По аналогии: $F_2 = \dfrac{p_c V_c}{n_1 - 1} \left(1 - \dfrac{1}{\varepsilon_{\text{c}}^{n_1 - 1}} \right)$.

Для участка «$b - b_0$» ($p_{a0} = p_a$): $F_3 = p_a \left(V_{a0} - V_a \right)$.

При этом, поскольку $\varepsilon_{\text{c}} = V_a / V_c$; $\varepsilon_{\text{p}} = V_{a0} / V_c$, то $F_3 = p_a V_c \left(\varepsilon_{\text{p}} - \varepsilon_{\text{c}} \right)$.

Следовательно,

$$p_i = F/(V_a - V_c) = \frac{p_c V_c}{V_a - V_c} \times$$

$$\times \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_p^{n_2-1}}\right) - \frac{1}{n_1 - 1}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_c^{n_1-1}}\right) - \frac{p_a}{p_c}\left(\varepsilon_p - \varepsilon_c\right)\right].$$

И окончательно получаем

$$p_i = \frac{p_c}{\varepsilon_c - 1}\left[\frac{\lambda}{n_2 - 1}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_p^{n_2-1}}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{n_1 - 1}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_c^{n_1-1}}\right) - \frac{p_a}{p_c}\left(\varepsilon_p - \varepsilon_c\right)\right].$$

С достаточной точностью индикаторный КПД равен $\eta_i = \left(T_z - T_{b0}\right)/T_z$ (тепловые потери в политропическом процессе сжатия в определенной степени компенсируются повышением теплосодержания при догорании горючей смеси в процессе ее расширения).

В общем анализе рассматриваемого теплового цикла первоначально используем представленные выше расчетные выражения при условии $\varepsilon_p = \varepsilon_c = 12{,}2$.

В этом «традиционном» конструктивном варианте двигателя, естественно, с разделенным впрыском бензина степень сжатия ε обычно составляет 10–11 единиц, среднее эффективное давление p_e теплового цикла — порядка 1,0 МПа, а индикаторный КПД $\eta_i \approx 0{,}36$ при эффективном КПД $\eta_e \approx 0{,}32$–$0{,}33$ [5].

При теплотворной способности бензина $Q_{тн}$=10300 ккал/кг, $\alpha = 1{,}0$, $L_0 = 14{,}9$ кг/кг общее количество теплоты, вносимой в цикл, — $Q_0 = 10300/(1 + 1 \cdot 14{,}9) = 647{,}8$ ккал/кг рабочей смеси, притом полезно используется для производства механической энергии $Q_1 = 0{,}36 \cdot 647{,}8 = 233{,}2$ ккал/кг (включая и чисто механические потери).

Примем с учетом поджатия воздуха при перепуске $p_a = 0{,}098$ МПа (1,0 кгс/см^2); $T_a = 290$ К; $n_1 = 1{,}38$; а учитывая периодичность процесса впрыска топлива, несколько усложняющего процесс смесеобразования и влекущего за собой увеличение продолжительности сгорания (догорания) топлива, — $n_2 = 1{,}18$; $c_v = 0{,}17$ ккал/кг·град

Тогда: $p_c = 0{,}098 \cdot 12{,}2^{1{,}38} = 3{,}09$ МПа;

$$T_c = 290 \cdot 12{,}2^{1{,}38-1} = 750{,}3 \text{ К};$$

$$T_z = 233{,}2/0{,}17 + 750{,}3 = 2122{,}1 \text{ К};$$

$$\lambda = 2122{,}1/750{,}3 = 2{,}83;$$

$$p_z = 2{,}83 \cdot 3{,}09 = 8{,}74 \text{ МПа};$$

$$p_b = 8{,}74/12{,}2^{1{,}18} = 0{,}43 \text{ МПа};$$

$$T_b = 2122{,}1/12{,}2^{1{,}18-1} = 1352{,}8 \text{ К};$$

$$p_i = \frac{3{,}09}{12{,}2 - 1}\left[\frac{2{,}83}{1{,}18 - 1}\left(1 - \frac{1}{12{,}2^{1{,}18-1}}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{1{,}38 - 1}\left(1 - \frac{1}{12{,}2^{1{,}38-1}}\right)\right] = 1{,}13 \text{ МПа}.$$

$$\eta_i = \left(2122{,}1 - 1352{,}8\right)/2122{,}1 = 0{,}36.$$

При механическом КПД [3] $\eta_м = 1 - 0{,}12/1{,}13 = 0{,}894$ эффективные показатели $p_e = \eta_м p_i = 0{,}894 \cdot 1{,}13 = 1{,}01$ МПа; $\eta_e = \eta_м \eta_i = 0{,}894 \cdot 0{,}36 = 0{,}32$.

Как видим, соответствие реальным соотношениям практически абсолютно.

Все расчетные данные для $\varepsilon_р = \varepsilon_с = 12{,}2$, как и для $\varepsilon_р = 14{,}0$; 16,0; 17,6 и 20,0, внесены в прилагаемую таблицу.

Основные расчетные показатели теплового цикла бензинового дивгателя с впрыском топлива в функции соотношений хода поршня при расширении и сжатия $\varepsilon_р / \varepsilon_с$

№ п/п	$\varepsilon_р$	$\varepsilon_р / \varepsilon_с$	p_i, МПа	η_i	$\eta_м$	$p_в$, МПа	$\delta = p_в/1{,}01$	$\eta_в$	g_i, г/кВт·ч
1	12,2	1,00	1,13	0,36	0,894	1,01	1,00	0,32	268
2	14,0	1,15	1,18	0,38	0,898	1,06	1,05	0,34	252
3	16,0	1,31	1,23	0,39	0,902	1,11	1,10	0,35	245
4	17,6	1,44	1,26	0,40	0,905	1,14	1,13	0,36	238
5	20,0	1,64	1,30	0,41	0,908	1,18	1,17	0,37	232

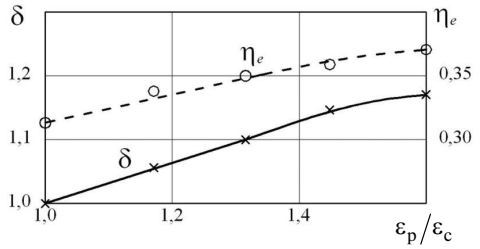


Рис. 2. Функциональная зависимость относительного роста среднего эффективного давления (мощности двигателя) δ и эффективного КПД η_e теплового цикла от отношения $\varepsilon_p/\varepsilon_c$

При этом расчет индикаторных КПД η_i для вариантов ε_p, отличных от исходного, был упрощен, поскольку величина p_i, характеризующая «полезную» работу и общую эффективность цикла, при известном ее исходном значении (p_i = = 1,13 МПа) $\eta_i = 0{,}36$ может быть определенао по выражению $\eta_i^p = 0{,}36\, p_i/1{,}13$.

Представленные в таблице результаты однозначно свидетельствуют о преимуществах повышенной степени расширения, способствующей и росту мощности двигателя (среднего эффективного давления теплового цикла) и его экономичности (эффективного КПД).

Так, в рассмотренных пределах соотношения $\varepsilon_p/\varepsilon_c$ от 1,0 до 1,64 среднее эффективное давление p_e возросло с 1,01 до 1,18 МПа при отношении $\delta = p_p / p_c = 1{,}18/1{,}01 = 1{,}17$, т. е. на 17 %, а эффективный КПД η_e — примерно на 11–12 %, достигнув абсолютного значения 0,37, что значительно превышает значение для двигателей с традиционным равенством степеней сжатия и расширения рабочего тела.

Графически относительный прирост среднего давления цикла $\delta = p_e/1{,}01$ и эффективного КПД η_e в функции $\varepsilon_p/\varepsilon_c$ представлены на рис. 2.

Вполне очевидны при этом приращения по мере роста δ как среднего эффективного давления p_e, так и эффективного КПД η_e.

Следует однако особо отметить, что с возрастанием отношения $\varepsilon_p/\varepsilon_c$ имеет место снижение интенсивности прироста величин p_e и η_e, связанное с естественной убылью энергии выпускных газов при их расширении из-за падения давления (кривая «$z - b_0$», на рис. 1).

Это снижение интенсивности достигает нулевого значения при падении давления в цилиндре до атмосферного и в рассматриваемом случае имеет место, примерно, при $\varepsilon_p = 45$, что соответствует ходу поршня в 3,7 раза более его хода в процессе сжатия.

В общем, как видно по рис. 2, цикл с продолженным расширением имеет явную перспективу, поскольку даже в пределах рассмотренных достаточно узких значений $\varepsilon_p/\varepsilon_c$ допускает возможность получения большего эффекта по основным эксплуатационным показателям двигателей в сравнении с реально достигнутыми при натурных испытаниях двигателя, о котором шла речь выше.

В практической реализации возможности дальнейшего улучшения эксплуатационных показателей двигателей рассмотренным способом надлежит, строго говоря, учитывать влияние на конструкцию двигателей и иных их показателей, таких, как габариты и масса двигателей, растущие при увеличении хода поршня, долговечность, обусловленная увеличением средней скорости поршня, зависящей от величины хода поршня, и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Настоящий Аткинсон [Текст] // Авторевю.— 2011. № 19.– С. 10.

2. А вместо сердца пластмассовый мотор [Текст] / В. Санников // Популярная механика. –2010. № 1(87) — С. 86–88.

3. **Русинов, Р.В.** Математическая модель теплового цикла поршневых двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 1(142).— С. 182–188.

4. **Русинов, Р.В.** К вопросу построения математической модели теплового цикла двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов, И.М. Герасимов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 3-2(154), С. 132–137.

5. **Русинов, Р.В.** Тепловые двигатели. Двигатели автомобилей и тракторов [Текст]: Учебное пособие / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 27.

РУСИНОВ Ростислав Викторович — *доктор технических наук, профессор кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 534-14-10

ЭЛИЗОВ Александр Дмитриевич — *кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 534-14-10

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — *кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 534-14-10
dr-idpo@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 620.199.001.18

Т.Д. Ахметшин, В.В. Носов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭТАПА ОДНОРОДНОГО РАЗРУШЕНИЯ

T.D. Akhmetshin, V.V. Nosov

ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF CONSTRUCTION MATERIALS FOUNDED IN THE PHASE OF HOMOGENEOUS DESTRUCTION

Статья посвящена проблеме определения ресурса технических объектов, которая сводится к нахождению времени, оставшегося до наступления их предельного состояния, неразрушающим методом — на основании анализа сигналов акустической эмиссии (АЭ) с позиции микромеханической модели разрушения и временных параметров АЭ.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ. ОДНОРОДНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. РЕСУРС. МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

The article is devoted to the problem of determining a resource of technical objects, which boils down to finding the time remaining before their limiting state, non-destructive method for the analysis of acoustic emission (AE) from a position of micro-mechanical models of destruction and time parameters of AE.

NON-DESTRUCTIVE TESTING. ACOUSTIC EMISSION. HOMOGENEOUS DESTRUCTION. RESOURCE. MICROMECHANICAL MODEL.

Надежность технических объектов зависит от точности оценки их ресурса. Оценка ресурса технического объекта сводится к нахождению времени, оставшегося до наступления его предельного состояния. Существует большое количество методов разрушающего и неразрушающего контроля для решения данной проблемы. К недостаткам существующих методик контроля разрушения можно отнести:

низкую точность оценки, поскольку методики основаны на неадекватных моделях (дают качественную оценку; занижают значение остаточного ресурса при неучете неоднородности состояния), статистически неустойчивы и имеют повышенную чувствительность к помехам (не учитывают изменения условий регистрации сигналов АЭ во время контроля, завышают значение ресурса в случае их отсутствия);

трудоемкость, так как требуют проведения обучающего эксперимента и определения регрессионных зависимостей вследствие недостаточной физической обоснованности и базирования на статистических моделях;

они не дают долгосрочного прогноза остаточного ресурса, поскольку основаны на регистрации только заключительной стадии разрушения (следствие пренебрежения микромеханическими аспектами разрушения и АЭ-излучения).

В предлагаемой статье рассматривается метод нахождения времени до разрушения на основании анализа сигналов акустической эмиссии, полученных в результате испытаний опытных образцов. Методика обладает повышенной точностью. Предложенные АЭ-показатели тесно связаны с определяющим прочность процессом, статистически устойчивы к помехам регистрации. Снижена неопределенность в оценке класса источника сигналов АЭ. Методика проста в применении, реализуется без обучающего эксперимента, универсальна и унифицирована, так как диагностические параметры позволяют оценить ресурс и стандартные характеристики прочности различных по структуре и размерам объектов. Главное достоинство данного метода — возможность оценки ресурса объекта на основании информации, полученной неразрушающим методом на месте эксплуатации. Ис-

пользуемые физическая и математическая модели не зависят от множества внешних факторов, — это упрощает модель, делает ее наиболее точной.

Описание задачи

Основная задача — достичь максимально возможной точности определения времени до разрушения. Программа, разработанная применительно к данной задаче, использует для аппроксимации этап однородного разрушения, определение которого способствует увеличению точности метода.

Одна из основных причин нарушения работоспособности и уменьшения ресурса конструкций и деталей машин — развитие в их материале процесса накопления повреждений. Для описания этого процесса используется микромеханическая модель разрушения, согласно которой временная зависимость поврежденности материала в условиях мелкодисперсного роста концентрации микротрещин C имеет следующий вид:

$$C(t) = C_0\left(1 - \exp\left[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\Theta_{\text{ср}}(\bar{t})}\right]\right), \qquad (1)$$

где t — текущее время; C_0 — начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения; $\theta_{\text{ср}}$ — среднестатистическое время ожидания разрушения одного структурного элемента, задаваемое формулой Журкова, при начальном условии $C(0) = 0$.

Формула Журкова в условиях растяжения при постоянстве напряжения имеет вид

$$\theta_{\text{ср}} = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \qquad (2)$$

где $\tau_0 \approx 10^{-13}$, с, — период атомных колебаний; U_0 — энергия активации процесса разрушения; γ — структурно-чувствительный коэффициент; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Из-за неоднородности структурного и напряженного состояний материала среднестатистические значения времени разрушения структурных элементов тела в общем случае неодинаковы. Таким образом, для различных элементов параметр Θ принимает различные значения. Для характеристики неоднородности состояния материала вводится функция $\Psi(\gamma)$ распределения параметра γ по структурным элементам. В качестве функции $\Psi(\gamma)$ в зависимости от степени неоднородности материала используются различные распределения. В нашей работе при описании разрушения образцов сварных соединений рассматриваются два из них (рис. 1):

ограниченное вейбулловское распределение с параметрами k, λ, q

$$\Psi(\gamma) = \begin{cases} 0, \lambda \in [0, q), \\ A\left(\frac{k}{\lambda}\right)\left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(\left(-\frac{\gamma}{\lambda}\right)^k\right) \gamma \in [q, \infty); \end{cases} \qquad (3)$$

$$A = \frac{1}{\int_q^\infty \left(\frac{k}{\lambda}\right)\left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(\left(-\frac{\gamma}{\lambda}\right)^k\right) d\gamma};$$

логарифмически-нормальное распределение с параметрами σ_z, μ

$$\psi(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z \gamma} \exp\left[-\frac{(\ln(\gamma) - \mu)^2}{2\sigma_z^2}\right]. \qquad (4)$$

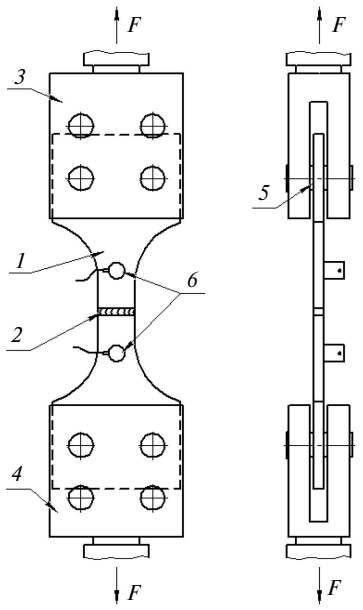


Рис. 1. Схема нагружения образца:
1 — образец; *2* — сварной шов; *3* — верхний захват нагружающего устройства; *4* — нижний захват нагружающего устройства; *5* — палец; *6* — ПАЭ

Зависимость концентрации микротрещин от времени для неоднородного материала можно представить в виде

$$C(t) = C_0 \int_{\gamma_{min}}^{\gamma_{max}} \psi(\gamma) \left(1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma, \quad (5)$$

где γ_{min} и γ_{max} — минимальное и максимальное значения γ для данного распределения $\Psi(\gamma)$.

Переход к макроскопическому разрушению материала происходит, когда число разрушенных структурных элементов достигает 0,01 от числа начальных: $C/C_0 = 0{,}01$. Время до разрушения τ^* находится из уравнения

$$\int_{\gamma_{min}}^{\gamma_{max}} \psi(\gamma) \left(1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma = 0{,}01. \quad (6)$$

Для вычисления времени до разрушения технического объекта необходимо определить значения величин, входящих в уравнение (6). Необходимо знать зависимость напряжения от времени, температуру, величину энергии активации U_0 (постоянна для конкретного материала) и параметры функции $\Psi(\gamma)$. Для нахождения последних используется регистрация сигналов АЭ при нагружении объекта контроля в области упругих деформаций. Число сигналов АЭ $N_\Sigma(t)$ пропорционально числу разрушенных структурных элементов:

$$N_\Sigma(t) = k_{AE} C(t),$$

или

$$N_\Sigma(t) = $$

$$= k_{AE} C_0 \int_{\gamma_{min}}^{\gamma_{max}} \psi(\gamma) \left(1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma, \quad (7)$$

где k_{AE} — акустико-эмиссионный коэффициент (может быть принят постоянным при нагружении с постоянной скоростью в области упругих деформаций).

Параметры функции $\Psi(\gamma)$ находятся путем аппроксимации экспериментальной зависимости числа импульсов АЭ от времени теоретической кривой (7). Далее определяется время до разрушения технического объекта из уравнения (6).

Описание эксперимента

В работе предполагалось определение параметров функции $\Psi(\gamma)$ для образцов стыковых сварных соединений. Материал пластин — сталь Ст3пс; сварка — ручная и автоматическая в среде углекислого газа. Образцы испытывались на растяжение с постоянной скоростью роста деформации, при этом регистрировались сигналы АЭ. Нагружение образцов производилось следующим образом (рис. 1). Концы образца *1* закреплялись в захватах *3* и *4* испытательной установки посредством пальцев *5*. Верхний захват 3 оставался неподвижным, а нижний захват 4 перемещался вертикально вниз с постоянной скоростью. Сила, приложенная к образцу, определялась по шкале установки (цена деления шкалы 3000 Н). Для регистрации сигналов АЭ была использована двухканальная акустико-эмиссионная система СДАЭ-16(2), которая состояла из двух преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) типа П113с, предварительных усилителей, блока регулирования усиления, блоков обработки сигналов АЭ, блока управления и компьютера. Принцип работы одного ее канала следующий: акустический сигнал, возникающий в материале образца при его нагружении, превращается пьезоэлектрическим преобразователем в электрический импульс, который подвергается усилению и обработке, после чего информация поступает в компьютер, где отображается в виде таблицы данных и графиков зависимости от времени различных параметров АЭ сигнала. Регистрировались число импульсов АЭ, их амплитуда, энергия, длительность, суммарный счет АЭ и время нарастания сигнала.

Рабочий диапазон частот аппаратуры составлял 20–1000 кГц, эффективное значение напряжений собственных шумов усилительного тракта, приведенное ко входу предварительного усилителя, не превышало 5 мкВ. Нижний уровень порога дискриминации системы определялся необходимостью устранения электромагнитных помех и составлял 47 дБ на каждом канале. Для регистрации сигналов были выбраны преобразователи с диапазоном частот 20–500 кГц.

Для обработки первичных данных АЭ испытаний, определения коэффициентов микромеханической модели разрушения предназначена программа RG, состоящая из нескольких макросов Microsoft Excel.

Одним из этапов выполнения работы является нахождение интервала для аппроксимации. Требуется выбрать линейный участок зависимости логарифма числа импульсов от времени (этап однородного разрушения), а также разработать методологию нахождения данного участка. Были произведены испытания 30-ти образцов и проанализированы: временная зависимость числа импульсов, логарифм числа импульсов, длительность импульсов, коэффициент перекрытия импульсов (вычисляется как отношение суммарной длительности импульсов в течение интервала времени к величине этого интервала), амплитуда, коэффициент вариации амплитуды, параметр K_{nt} (отношение активности АЭ к средней длительности импульсов). В результате анализа и выявления зависимостей выделены следующие задачи этапов нахождения начальной и конечной точек прямолинейного участка:

а) найти на графике зависимости длительности импульсов АЭ от времени момент t_1, когда наблюдается резкий рост длительности импульсов (свидетельствует о начале пластического деформирования);

б) найти на графике зависимости коэффициента перекрытия от времени момент t_2, соответствующий началу роста коэффициента перекрытия. Он свидетельствует о начале пластического деформирования, при котором происходит движение дислокаций, мелкие перестройки в структуре материала, а значит, большое количество «коротких» сигналов, которые накладываются друг на друга. Они сливаются, что отражается в виде скачка на графике зависимости коэффициента перекрытия от времени;

в) из двух значений времени (t_1 и t_2) выбрать меньшее.

Пример определения интервала времени для аппроксимации. Для одного из образцов стыковых сварных соединений:

а) резкий рост длительности импульсов наблюдается в момент времени $t_1 = 186$ с (см. рис. 2).

б) коэффициент перекрытия импульсов начинает расти в момент времени $t_2 = 175$ с (рис. 3).

в) $t_2 < t_1$ — для проведения дальнейших действий используем величину времени t_2. Изменение характера сигналов АЭ указывает на появление пластической деформации материала образца в момент времени $t_2 = 175$ с.

Далее требуется найти первоначальную точку линейного участка (начало упругой деформации), для чего рассматриваем график зависимости коэффициента вариации амплитуды от времени. На участке от 0 до t_2 (двигаемся от t_2 к 0) выделяем момент t_1, в который происходит аномальный скачок коэффициента вариации амплитуды.

Скачок вариации амплитуд объясняется тем, что происходит разрушение связей с большим разбросом размеров, структур и напряжений. Разрушение неоднородно, а следовательно, возникают аномально большие амплитуды.

Полученный интервал вносится в макрос программы. Макрос строит теоретическую кривую зависимости числа импульсов АЭ от времени, используя в качестве функции $\Psi(\gamma)$ ограниченное вейбулловское распределение.

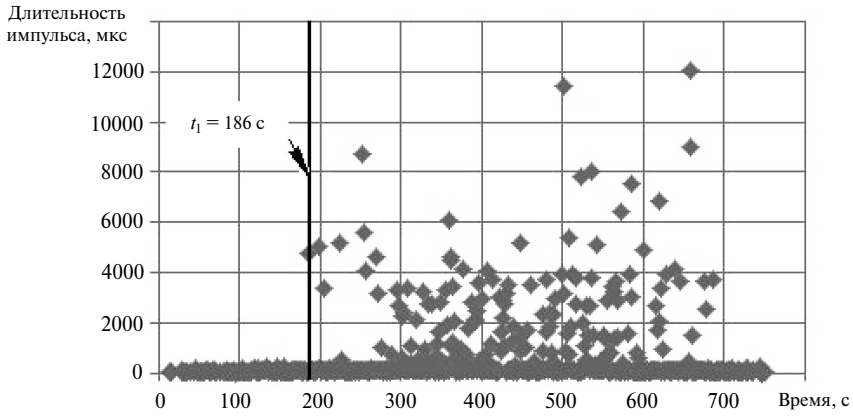


Рис. 2. Определение момента времени t_1 по графику зависимости длительности импульсов от времени

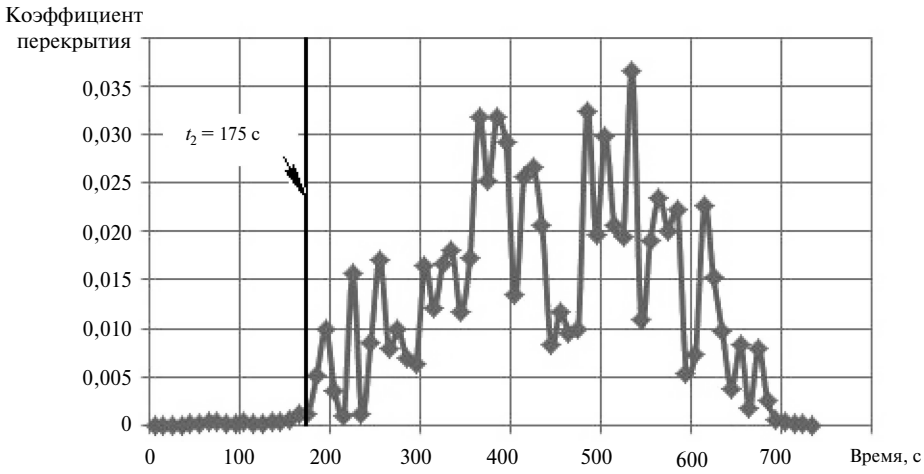


Рис. 3. Определение момента времени t_2 по графику зависимости коэффициента перекрытия импульсов от времени

Изменяя величину параметра λ, мы можем проследить за изменением среднего значения параметра γ распределения Ψ(γ).

Путем изменения параметров λ, q и $k_{AE}C_0$ ($k = 3$ — одинаков для всех образцов) добиваемся совпадения теоретической и экспериментальной кривых $N_\Sigma(t)$. При этом величина «Средней ошибки аппроксимации» должна быть минимальной. При совпадении кривых получаем искомые значения параметров микромеханической модели разрушения.

Таким образом, нами был получен метод определения участка однородного разрушения; с его помощью увеличена точность определения времени до разрушения объекта на 2 %. Сократилась погрешность (с 15 до 13 %), данный результат в пределах нормы. Мы убедились, что разработанная методика обладает повышенной точностью. На основе АЭ-показателей, напрямую связанных с определяющим прочность процессом и статистически устойчивых к помехам регистрации, получены файлы MS Excel, представляющие собой базу, позволяющую выполнять различные вычисления по желанию пользователя. Мы убедились в простоте применения и универсальности методики, так как диагностические параметры позволяют оценить ресурс и стандартные характеристики прочности различных по структуре и размерам объектов.

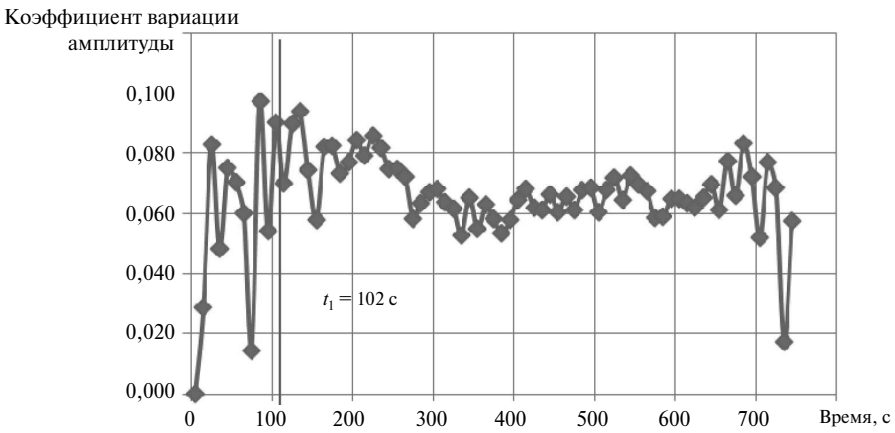


Рис. 4. Определение момента времени t_1 по графику зависимости коэффициента вариации амплитуды от времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Носов, В.В.** Методология оценки прочности и ресурса технических объектов с помощью метода АЭ [Текст] / В.В. Носов // Труды СПбГТУ. № 504.— 2007.— С. 119–132.

2. **Лахова, Е.Н.** Моделирование процесса перестройки структуры при пластической деформации сварных соединений металлоконструкций [Текст] / Е.Н. Лахова, В.В. Носов // Современное машиностроение. Наука и образование: матер. Междунар. научно-практ. конф. 14–15 июня 2011 года, Санкт-Петербург.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 301–309.

3. **Регель, В.Р.** Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский.— М.: Наука, 1974.

4. **Носов, В.В.** Микромеханическая модель акустической эмиссии гетерогенных материалов [Текст] / В.В. Носов, И.Н. Бураков // Дефектоскопия.— 2004. № 2.— С. 53–61.

5. **Бураков, И.Н.** Оценка параметров процесса разрушения на основе компьютерного моделирования акустической эмиссии сварных соединений [Текст] / И.Н. Бураков // Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов: Матер. междун. науч. конф.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004.— С. 38–39.

АХМЕТШИН Тимур Дамирович — *студент VI курса Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
akhmet-timur@yandex.ru

НОСОВ Виктор Владимирович — *доктор технических наук, профессор кафедры машиноведения и основ конструирования Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
nosovvv@list.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 531:532

М.Р. Петриченко

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ТОЖДЕСТВА И УРАВНЕНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ИЗОТРОПНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

M.R. Petrychenko

THE THERMODYNAMIC IDENTITY AND EQUATION NONISOTHERMAL FILTRATION IN POROUS MEDIUM ISOTROPIC

Линейный (градиентный) закон фильтрации Дюпюи трансформирован для неизотермического баротропного течения совершенного газа. Интегральные характеристики фильтрации (коэффициенты проницаемости и фильтрации) связаны с интенсивностью теплообмена по ходу фильтрации. Изотермическая фильтрация получается как предельный случай неизотермической фильтрации при значении показателя политропы $n \to 1 \pm 0$. Доказана нелинейность распределения давления и пассивных примесей по ходу неизотермической фильтрации.

ФИЛЬТРАЦИЯ. КОЭФФИЦИЕНТ ФИЛЬТРАЦИИ. КОЭФФИЦИЕНТ ПРОНИЦАЕМОСТИ. ПОРИСТАЯ СРЕДА. БАРОТРОПНОЕ ДВИЖЕНИЕ.

Linear (gradient) filtration law Dupuis transformed for non-isothermal barotropic flow of a perfect gas. Integral characteristics of the filter (the coefficients of diffusion and filtration) are related to the intensity of heat transfer in the course of filtration. Isothermal filtration is obtained as a limiting case of isothermal filtration at a value of the polytropic index $n \to 1 \pm 0$. We prove the non-linearity of the pressure distribution and passive impurities in the course of isothermal filtration.

FILTRATION, FILTRATION COEFFICIENT, PERMEABILITY COEFFICIENT OF THE POROUS MEDIUM, BAROTROPIC.

Расчеты фильтрационных движений обычно проводятся для изотермической фильтрации капельных жидкостей и газов. Неизотермическая фильтрация сопровождается теплообменом между пористой средой и фильтруемой жидкостью, что приводит к изменению температуры жидкости по ходу фильтрации.

Для расчета средней скорости фильтрации используется формула Дюпюи

$$v = -\frac{\kappa}{g}\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dx}. \qquad (1)$$

Эту формулу можно также записать в виде

$$v = \frac{\kappa}{g}\frac{dl_T}{dx}, \qquad (1a)$$

где $dl_T = -\frac{dp}{\rho}$ — элементарная техническая работа расширения, связанная с изменением кинетической энергии и с подводом теплоты к лагранжевой частице (к жидкому объему) фильтрующейся жидкости. В данном случае техническая работа выступает в качестве «потенциала фильтрации».

Для учета теплообмена в неявном виде можно использовать условие баротропности движения. Пусть

$$\pi = \frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n = \omega^n;$$

$$\tau = \frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \pi^{\frac{n-1}{n}}, \qquad (2)$$

где n — показатель политропы. Значениям $n < k$ отвечает фильтрационный поток с подводом теплоты по ходу фильтрации, а значениям $n > k$ — отвод теплоты по ходу фильтрации. При $1 < n < k$ подвод теплоты не приводит к нагреванию газа; при $0 < n < 1$ подвод теплоты приводит к нагреванию газа.

С учетом (2) формула (1) может быть записана в одном из двух видов — через безразмерный перепад давления π (2) и через безразмерный перепад температур τ (3):

$$v = -\frac{\kappa}{g}\frac{p_0}{\rho_0}\pi^{-\frac{1}{n}}\frac{d\pi}{dx}; \qquad (1б)$$

$$v = -\frac{\kappa}{g}\frac{p_0}{\rho_0}\frac{n}{n-1}\frac{d\tau}{dx}. \qquad (1в)$$

Очевидно, что при $n \to 1 \pm 0$ выражение (1*в*) становится неопределенным. Но

$$\lim_{n\to 1\pm 0}\frac{n}{n-1}\frac{d\tau}{dx} = \lim_{n\to 1\pm 0}\frac{n}{n-1}\frac{d\pi^{\frac{n-1}{n}}}{dx} = \frac{d\ln\pi}{dx},$$

что приводит к (1*б*), $n = 1$. При $n \to \pm\infty$ формулы (1*б*, *в*) превращаются в формулы фильтрации для капельной жидкости.

В фильтрационном движении массовая скорость $\rho v = \text{const}$. В силу (1 *б*,*в*)

$$\rho v = -\frac{\kappa}{g}p_0\frac{d\pi}{dx}; \qquad (1г)$$

$$\rho v = -\frac{\kappa}{g}\frac{n}{n-1}p_0\tau^{\frac{1}{n-1}}\frac{d\tau}{dx} \qquad (1д)$$

и, на первый взгляд, распределение давления по ходу фильтрации должно быть линейным при любом, неизотермическом и изотермическом, течении. Но коэффициент фильтрации к связан с коэффициентом проницаемости s (эффективное сечение фильтрации) тождеством

$$\frac{\kappa}{g} = \frac{s}{\nu}. \qquad (3)$$

Для совершенного газа $\nu = \nu_0\tau^m$; $\frac{1}{2} < m < 1$. Стало быть, в силу (3)

$$\rho v = -\frac{s}{\nu_0}p_0\pi^{-\frac{m(n-1)}{n}}\frac{d\pi}{dx}. \qquad (1е)$$

Пусть (см. рис. 1) $\pi(0) - 1 = \pi(\delta) - \pi_1 = 0$. Тогда в силу (1*е*)

$$\pi = \left(1 - \left(1 - \pi_1^{1-r}\right)\frac{x}{\delta}\right)^{\frac{1}{1-r}}, \qquad (4)$$

где $r := \frac{m(n-1)}{n}$; $r > 0$ при $n > 1$ и $r < 0$ при $n < 1$. Следовательно, справедлива следующая теорема:

Теорема 1

При отводе теплоты или при слабом подводе теплоты, недостаточном для увеличения температуры фильтрационного потока по ходу фильтрации, кривая давления имеет выпуклость вниз. Наоборот, при разогреве газа по ходу фильтрации ($r < 0$, $n < 1$) кривая давления имеет выпуклость вверх. И только в случае $r = 0$ ($n = 1$) при изотермическом фильтрационном движении линия давления прямая. При $n \to \infty$ (капельная жидкость) $r \to 0$, и линия давления прямая при любых законах подвода или отвода теплоты.

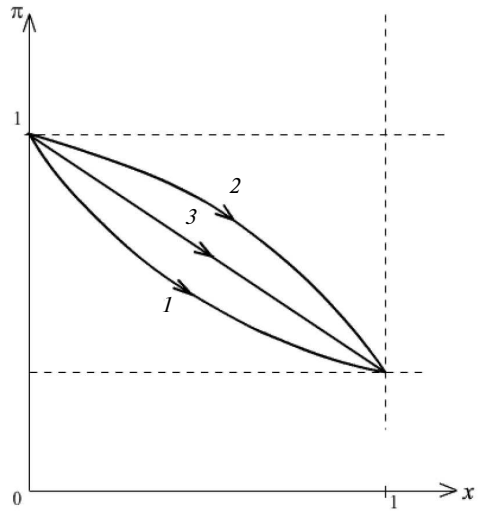


Рис. 1. Распределение безразмерного перепада давления π по ходу фильтрации для разных случаев:

1) охлаждения газа по ходу фильтрации ($r > 0$, $n > 1$);
2) нагревания газа по ходу фильтрации ($r < 0$, $n < 1$);
3) постоянной температуры по ходу фильтрации ($r = 0$, $n = 1$)

Эта теорема имеет простую физическую мотивировку. Пусть газ по ходу фильтрации охлаждается (либо пористое тело холоднее газового потока, либо подогрев газа компенсируется падением температуры за счет падения давления). Тогда средняя скорость фильтрации падает по ходу фильтрации, т. е. пористая среда ведет себя как диффузор. Если же газ подогревается пористой средой, то средняя скорость фильтрации растет по ходу фильтрации, и пористая среда ведет себя как конфузор.

В силу (1*д*) и (3)

$$\rho v = \frac{sp_0}{\nu_0}\frac{n}{n-1}\tau^{\frac{1}{n-1}-m}\frac{d\tau}{dx},$$

т. е. для постоянства массовой скорости необходимо, чтобы $\frac{d\tau^{\frac{n}{n-1}-m}}{dx} = \text{const}$.

Пусть $\tau(0) - 1 = \tau(\delta) - \tau_1 = 0$. Тогда распределение температуры по ходу фильтрации имеет вид

$$\tau = \left(1 - \left(1 - \tau_1^{\frac{n}{n-1}-m}\right)\frac{x}{\delta}\right)^{\frac{n-1}{n+m-nm}}. \qquad (4a)$$

Теорема 2

При $n > 1$ (охлаждение газа по ходу фильтрации) кривая температуры имеет выпуклость вверх; наоборот, при $n < 1$ (нагревание газа за счет теплоотдачи с пористой средой) кривая температуры имеет выпуклость вниз. При $n \to \pm\infty$, кривая температуры всегда — и при подводе теплоты и при отводе теплоты — выпукла вниз.

Как и в теореме 1, физическая мотивировка теоремы 2 почти очевидна. Действительно, при охлаждении газа по ходу фильтрации средняя скорость фильтрационного потока падает. Чем меньше скорость фильтрации, тем длительнее контакт частицы газа с пористой средой и тем интенсивнее охлаждение газа. Нагревание газа в пористой среде равносильно охлаждению горячего газа при обратном направлении фильтрации — от сечения $X = 1$ к сечению $X = 0$.

На рис. 2, 3 представлены графики изменения давления и температуры, построенные в соответствии с решениями (4), (4*а*).

Вместо формулы Дюпюи (1) в качестве «потенциала фильтрации» предлагается использовать «работу проталкивания» dl_f, определяемую как $-dl_f = d\left(\frac{p}{\rho}\right)$, или, что удобнее, «обобщенную

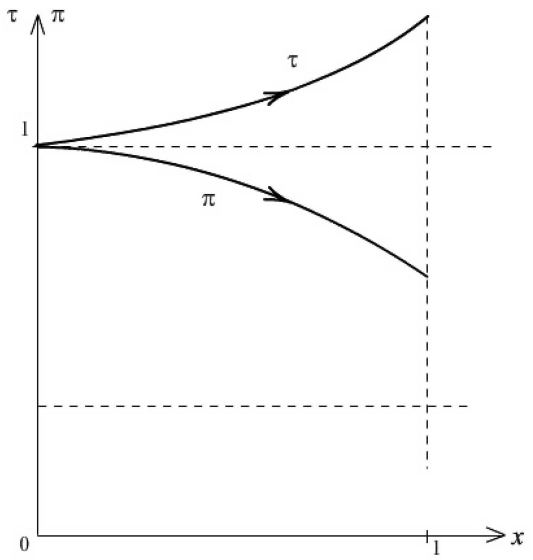


Рис. 2. Распределение безразмерных перепадов давления π и температурного напора τ по ходу фильтрации при нагревании газа по ходу фильтрации

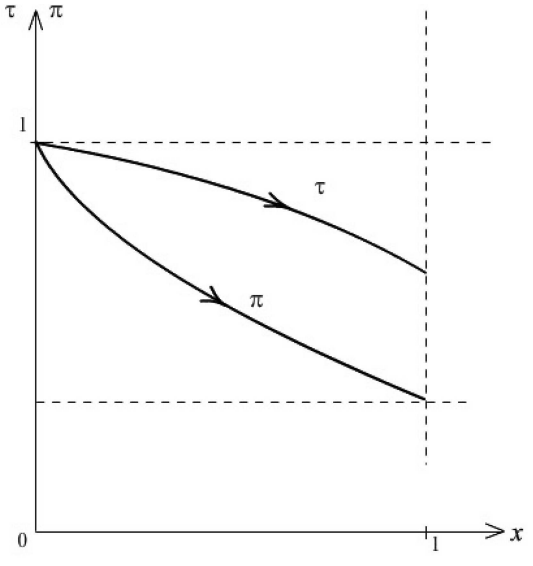


Рис. 3. Распределение безразмерных перепадов давления π и температурного напора τ по ходу фильтрации при охлаждении газа по ходу фильтрации

работу проталкивания» $-dl_{f,n} = \rho^{n-2} d\left(\frac{p}{\rho^{n-1}}\right)$. При $n = 1$ обобщенная работа проталкивания изотермического процесса совпадает с технической работой. Использование же работы проталкивания в «чистом виде» приводит в изотермическом движении к парадоксальному результату — $v = 0$, исключающему изотермическую фильтрацию. При $n = 2$ (интенсивное охлаждение) обобщенная работа проталкивания совпадает с работой проталкивания. При $n \to \pm\infty$ плотность ρ не зависит от давления. Тогда $dl_{f,\infty} = -\frac{dp}{\rho}$, а формула Дюпюи записывается, как для капельной жидкости.

Справедливы равенства, аналогичные равенствам (1*а*–*д*):

$$v = -\frac{\kappa}{ng}\frac{p_0}{\rho_0}\pi^{\frac{1}{n}}\frac{d\pi}{dx};$$

$$\rho v = -\frac{\kappa p_0}{ng}\frac{d\pi}{dx} \qquad (5)$$

и

$$v = -\frac{\kappa}{g(n-1)}\frac{p_0}{\rho_0}\frac{d\tau}{dx};$$

$$\rho v = -\frac{\kappa p_0}{g(n-1)}\tau^{\frac{1}{n-1}}\frac{d\tau}{dx}. \qquad (5a)$$

Средние скорости, подсчитанные по формулам (1) и (5) отличаются в n раз. Если n близко к 1, результаты совпадают. Теоремы 1 и 2, рассмотренные выше, сохраняют силу. Кроме того, вместо равенства (3) выполняется условие

$$\frac{\kappa}{ng} = \frac{s}{\nu}. \qquad (3a)$$

Определение коэффициента фильтрации зависит от n и совпадает с (3) только при изотермическом течении. Получается, таким образом, что для неизотермического течения коэффициент фильтрации зависит от температуры (через коэффициент вязкости ν) и от внешнего теплообмена (через показатель политропы n). Для изотермического течения постоянство коэффициента проницаемости s влечет постоянство коэффициента фильтрации κ.

Такое положение парадоксально только на первый взгляд. Действительно:

1) коэффициент фильтрации определяется и задается с погрешностью в десятки процентов (в логарифмической шкале), поэтому введение показателя политропы n в определение коэффициента фильтрации мало что меняет;

2) коэффициент проницаемости определяется для изотермического фильтрационного движения, т. е. $n = 1$. Теплообмен с пористой средой зависит от ее плотности. Пористая среда может иметь плотный скелет (всюду плотное множество точек скелета) и «тощий» скелет (нигде не плотное множество точек скелета) [1]. Эффективное сечение плотного скелета мало, нигде не плотного скелета — велико. Реальные пористые среды образуют промежуточные фильтры. Получается так: если $\kappa = \text{const}$, то $sn = \text{const}$, т. е. чем меньше n (чем меньше потери давления в пористой среде), тем больше эффективное сечение (или коэффициент проницаемости). Для $n \gg 1$ (капельные жидкости) коэффициент проницаемости стабильно мал.

Дифференциальное уравнение энергии для фильтрационного движения имеет вид

$$\frac{\nu}{\sigma}\frac{d^2T}{dx^2} = v\frac{dT}{dx}, \qquad (6)$$

где σ — число Прандтля.

Учитывая (5*а*), уравнение (6) можно записать так:

$$\frac{d^2\tau}{dX^2} + \frac{\sigma\kappa RT_0}{\nu g(n-1)}\left(\frac{d\tau}{dX}\right)^2 = 0; \quad X = \frac{x}{\delta} \in [0, 1]. \qquad (7)$$

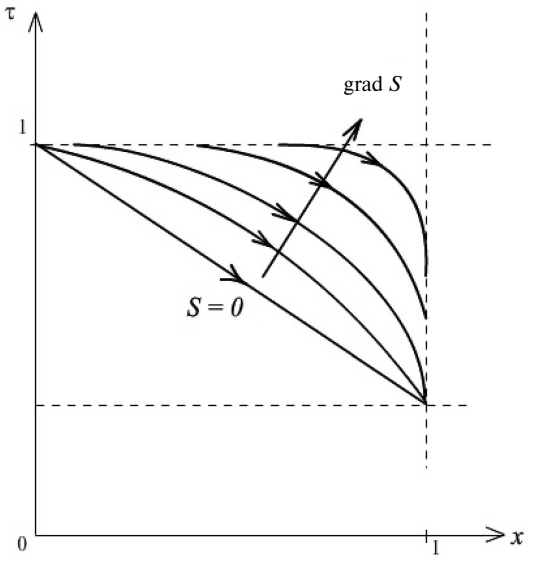


Рис. 4. Влияние фильтрационного числа Рэлея S на распределение перепада температуры τ по ходу фильтрации

Очевидно, что уравнение (7) уже учитывает теплообмен с твердым скелетом через показатель политропы n и коэффициент фильтрации κ. Уравнение (7) приводится в диссертации [2] для $n = 2$. Вместо τ использовалась переменная $\theta = \frac{1-\tau}{1-\tau_1} \in [0, 1]$, поэтому в левой части (7) изменен знак. Дробь $S = \frac{\sigma\kappa RT_0}{\nu g(n-1)}$ — некоторое число подобия фильтрационного переноса теплоты. Оно учитывает внешний теплообмен по периферии фильтрационного потока с пористой средой. Число S, очевидно, само зависит от τ через вязкость:

$$S = \frac{\sigma\kappa\tau^{-m}RT_0}{\nu_0 g(n-1)} = \frac{\sigma s RT_0\tau^{-2m}}{\nu_0^2}\frac{n}{n-1}.$$

Это число аналогично числу подобия Рэлея в теории термо-гравитационной конвекции.

Предельные условия для (7): $\tau(0)-1=\tau(1)-\tau_1=0$. Решение уравнения (7), удовлетворяющее этим предельным условиям:

$$X = \frac{\int\limits_{\tau}^{1}\exp\left(-\int\limits_{\omega}^{1}S(\varphi)d\varphi\right)d\omega}{\int\limits_{\tau_1}^{1}\exp\left(-\int\limits_{\tau}^{1}S(\varphi)d\varphi\right)d\tau}, \qquad (8)$$

где ω, φ — переменные интегрирования.

Предельные случаи:

1. $S \to \pm 0$. Значит, в силу (8)

$$X = \frac{1-\tau}{1-\tau_1}. \qquad (8a)$$

Следовательно, если фильтрационное число Рэлея мало (например, интенсивный подогрев, соответственно $n \to +0$, либо $s \to +0$, то температура фильтрационного потока отслеживает температуру твердого скелета пористой среды: распределение температуры такое же, как и в твердом теле.

2. $S \to \pm \infty$. Эта ситуация реализуется при приближении течения к изотермическому ($n \to 1 \pm 0$) либо при движении сквозь «тощий» скелет пористого тела $(s \gg 1)$. Тогда уравнение (7) допускает решение: $\tau = 1$, $X \to [0, 1]$.

Действительно, в этом случае уравнение (7) регулярно возмущено и его решения обладают свойством $\tau(X) \underset{S\to\infty}{\to} \tau_\infty$, $\frac{d\tau_\infty}{dX} = 0$, причем сходимость последовательности возмущенных решений к τ_∞ равномерная по X (см. рис. 4).

Выводы

1. При отводе теплоты или при слабом подводе теплоты, недостаточном для увеличения температуры фильтрационного потока по ходу фильтрации в однородной изотропной пористой среде, кривая давления имеет выпуклость вниз. Наоборот, при разогреве газа по ходу фильтрации кривая давления имеет выпуклость вверх. И только при изотермическом фильтрационном движении линия давления прямая. Для капельной жидкости линия давления прямая при любых законах подвода или отвода теплоты.

2. При охлаждении газа по ходу фильтрации в однородной изотропной пористой среде кривая температуры имеет выпуклость вверх; наоборот, при нагревании газа за счет теплоотдачи с пористой средой кривая температуры имеет выпуклость вниз. Для несжимаемой (капельной) жидкости кривая температуры всегда выпукла вниз — и при подводе теплоты и при отводе теплоты.

3. В плотной пористой среде изменение температуры по ходу фильтрации отслеживает изменение температуры твердого скелета. В неплотной пористой среде изменение температуры по ходу фильтрации минимально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Заманский, М.** Введение в современную алгебру и анализ [Текст] / М. Заманский / Пер. с франц.— М.: Наука, 1974.— С. 145–148.

2. **Петросова, Д.В.** Неизотермическая фильтрация воздуха через ограждающие конструкции замкнутых помещений [Текст]: Автореф. ... канд. техн. наук / Д.В. Петросова/ СПбГПУ.— 2012.— 21 с.

ПЕТРИЧЕНКО Михаил Романович — *доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики инженерно-строительного института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812)552-94-60
fonpetrich@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.74

А.Д. Гиргидов

ЗАМЕЧАНИЯ О ГИДРАВЛИКЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ ТРУБ

A.D. Girgidov

REMARKS TO THE HYDRAULIC CENTRIFUGAL CASTING PIPES

Для оценки формы свободной поверхности расплава при центробежном литье труб в изложнице с горизонтальной осью вращения вводится число Фруда для поля центробежной силы. Показано, что для тонкостенных труб свободная поверхность расплава коаксиальна изложнице. Для толстостенных труб свободная поверхность до начала затвердения либо эксцентрична, либо неустойчива и нестационарна. Вместе с тем по мере процесса затвердевания всегда образуется достаточно тонкий слой незатвердевшего расплава, при котором эксцентриситет свободной поверхности исключается.

ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ЛИТЬЕ ТРУБ. ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ. ЧИСЛО ФРУДА. ВОЛНЫ МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ. КОАКСИАЛЬНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ.

The shapes of inner melt free surface while centrifugal tube casting are considered. The Froude number for centrifugal force field is introduced to predict the shapes of the free surface during a solidification. Stable coaxial cylindrical surface of melt for the case of thin wall tube is stated. It is shown that to the end of solidification the inner free surface has no excentricitet anyway.

TUBE CASTING. CENTRIFUGAL FORCE. MELT. FROUDE NUMBER. EXCENTRICITET. SOLIDIFICATION.

Формы с вертикальной осью вращения для центробежного литья труб не используются, так как во избежание разностенности отливок их длина в осевом направлении при реализуемых на практике угловых скоростях вращения $\Omega = 100$ рад/с не должна превышать диаметр [1, 2]. Поле скорости расплава в случае форм с горизонтальной осью вращения не может быть строго стационарным [3, 4],причем для его приближенного описания нельзя использовать стандартные распределения для осесимметричных течений типа вихря Ренкина [5]. При использовании форм с горизонтальной осью условия изготовления отливки оцениваются коэффициентом гравитации K, представляющим собой отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести:

$$K = \frac{\Omega^2 r}{g}, \qquad (1)$$

где r — радиус, который обычно принимают равным радиусу формы R [1, с. 369], что вполне приемлемо для тонкостенных труб; g — вертикальная составляющая плотности распределения силы тяжести . Значения K на практике изменяются в пределах 75–100 в зависимости от материала формы и интервала затвердевания. Устойчивость внутренней поверхности расплава, как правило, не оценивается, и лишь отмечается [2, с. 278], что вследствие действия силы тяжести «слой расплава в нижней части формы должен быть тоньше, чем в верхней», а также, что по мере затвердевания фронты расплава продвигаются от стенок изложницы к оси вращения, а эксцентриситет его внутренней поверхности уменьшается до нуля к моменту полного затвердевания трубы. Далее в статье делается попытка уточнения некоторых особенностей описанного процесса. Предположим, что при вращении формы расплавленный металл находится в покое относительно стенок изложницы, и запишем интеграл уравнений покоящейся жидкости [6]:

$$p - \rho U = \text{const}, \qquad (2)$$

где p — гидростатическое давление; ρ — плотность жидкости (расплавленный металл); U — потенциал внешней массовой силы. Этот потенциал в рассматриваемом случае равен

$$U = U_g + U_{\text{цб}}, \qquad (3)$$

где $U_g = -gz$ — потенциал силы тяжести; $U_{\text{цб}} = \Omega^2 \dfrac{x^2 + z^2}{2}$ — потенциал центробежной силы. Подставив U в (2), имеем

$$p - \rho\left(-gz + \Omega^2 \frac{x^2 + z^2}{2}\right) = \text{const}. \qquad (4)$$

Постоянную интегрирования найдем, полагая, что при отсутствии силы тяжести (или ее пренебрежимо малой величине) свободная поверхность расплава (при $p = 0$) представляет собой коаксиальную цилиндрическую поверхность с радиусом r_0 (см. поз. *а* рис.).

В результате уравнение свободной (внутренней) поверхности расплава, используя коэффициент гравитации (1), представим в виде

$$x^2 + \left(z - \frac{R}{K}\right)^2 = r_0^2. \qquad (5)$$

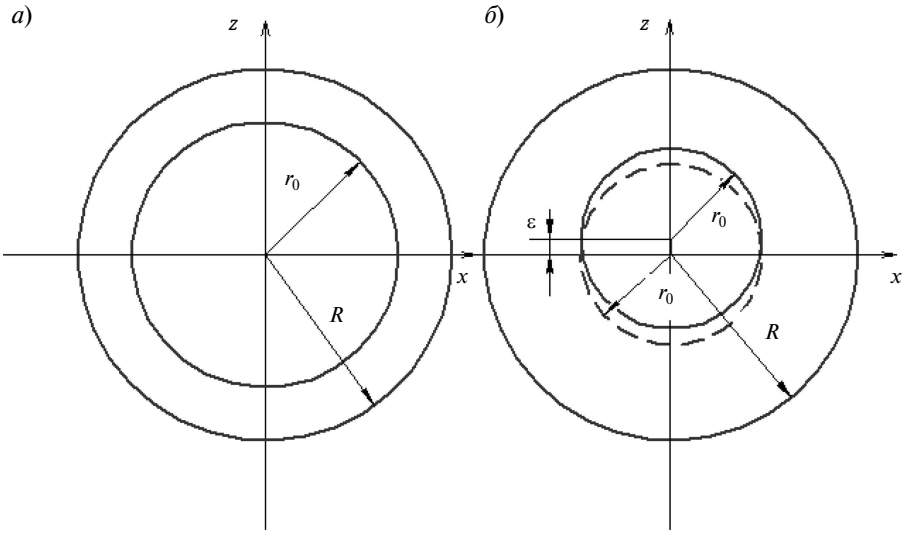
Полученный результат показывает, что свободная поверхность расплава является круглоцилиндрической с радиусом, равным r_0, и эксцентриситетом $\varepsilon = \dfrac{R}{K} = \dfrac{g}{\Omega^2}$ (см. поз. *б* рис.). Ось свободной поверхности смещена вверх от оси вращения (а не вниз, как ошибочно указано в [2]). Для принятых на практике значений K эксцентриситет не зависит от диаметра трубы и изменяется в пределах 1,0–1,5 мм.

Обратим внимание на то, что приведенные выше результаты получены в предположении о возможности относительного покоя в случае цилиндрической оси вращения изложницы. Чтобы оценить эффективность такой гипотезы, представим поле скорости расплава в виде суперпозиции двух полей:

1) стационарного поля вращения в состоянии покоя относительно изложницы (как твердого тела), которое формируется под действием центробежной силы. Свободная поверхность для этой части поля скорости является коаксиальной, цилиндрической и имеет радиус r_0;

2) нестационарного поля движения расплава под действием нестационарной (во вращающейся системе координат) силы тяжести. Так как сила тяжести значительно меньше центробежной $(K << 1)$, то движение будем рассматривать как малое возмущение, наложенное на вращение в состоянии относительного покоя (при отсутствии силы тяжести). Оно проявляется в виде изменения толщины вращающегося слоя жидкости, и его можно рассматривать как поверхностную волну малой амплитуды.

Рассматривая в общем случае нестационарное поле скорости, следует считать, что создаваемое силой тяжести возмущение (волна), будет переноситься вращающимся, как твердое тело, расплавом и вместе с тем перемещаться в противоположном направлении под действием силы



Свободная поверхность расплава во вращающейся изложнице с горизонтальной осью: *а*) при отсутствии силы тяжести; *б*) гипотетическая — при наличии силы тяжести в случае толстостенной трубы

тяжести. Чтобы выявить особенности этого процесса, воспользуемся критерием Фруда. Число Фруда представляет собой отношение кинетической энергии потока к потенциальной; в поле силы тяжести оно имеет вид [6]

$$Fr_h = \frac{v^2}{gh}, \qquad (6)$$

где v — средняя по глубине скорость потока; h — его глубина. В виду того, что плотность распределения центробежной силы $\Omega^2 r$, в отличие от силы тяжести, не является постоянной по толщине вращающегося слоя жидкости величиной, число Фруда в этом случае можно определить не единственным образом. В первом варианте, учитывая, что интерес представляют явления на свободной поверхности вращающейся в состоянии относительного покоя жидкости, примем определение числа Фруде в виде

$$Fr_0 = \frac{\Omega^2 r_0^2}{\Omega^2 r_0 (R - r_0)}, \qquad (7)$$

где Ωr_0 — скорость жидкости на свободной поверхности; $\Omega^2 r_0$ — плотность распределения массовой центробежной силы (аналог g); $(R - r_0)$ — толщина вращающегося слоя жидкости (аналог глубины h). Как известно [3], корень из числа Фруда

$$\sqrt{Fr_0} = \frac{\Omega r_0}{\sqrt{\Omega^2 r_0 (R - r_0)}} \qquad (8)$$

представляет собой отношение скорости потока к скорости перемещения возмущений свободной поверхности (поверхностных волн).

Если число Фруда больше 1, то движение — бурное, и скорость потока больше скорости перемещения волн. При этом возмущения, возникающие под действием силы тяжести, будут сноситься вращающимся слоем жидкости; их встречная скорость недостаточна для формирования стационарной формы поверхности. Для потоков в открытых руслах с горизонтальным дном это явление трактуется в [7] как невозможность существования на свободной поверхности в бурном потоке двухмерных стационарных (стоячих) волн малой амплитуды; в бурном потоке могут формироваться только трехмерные (косые) волны.

Из условия $Fr_0 > 1$ и формулы (7) следует

$$r_0 > \frac{R}{2}, \quad \text{или} \quad R - r_0 < \frac{R}{2}. \qquad (9)$$

Таким образом, в случае изготовления тонкостенных труб возмущения, возникающие на свободной поверхности под действием силы тяжести, не могут образовать стационарной эксцентричной цилиндрической поверхности (5), относительный покой также невозможен. Эти возмущения в результате большой скорости их переноса равномерно распределяются по всей свободной поверхности, которая становится практически стационарной (устойчивой) цилиндрической и коаксиальной, что исключает разностенность отливаемых труб (см. рис. *а*). Таким образом, условия изготовления тонкостенных труб в изложницах с горизонтальной осью вращения более благоприятны, чем при отливке в условиях относительного покоя в изложницах с вертикальной осью вращения.

Если труба толстостенная, так что $Fr_0 < 1$ и $R - r_0 > \frac{R}{2}$, то режим вращающегося слоя жидкости будет спокойный, и возмущение свободной поверхности, возникающее под действием силы тяжести, может перемещаться навстречу вращающемуся потоку со скоростью большей, чем скорость самого потока. При этом может сформироваться стационарная стоячая волна [7] и образоваться стационарная эксцентричная цилиндрическая свободная поверхность (5) (см. рис. *б*). Возможно, в некоторых случаях, не определяемых в настоящем анализе, свободная поверхность будет неустойчивой и нестационарной.

Отметим, что при любых числах Фруда, даже если свободная поверхность будет стационарной, поле скорости жидкости как в неподвижной системе координат, так и во вращающейся будет нестационарным.

Аналогичное рассуждение можно провести и при других возможных формулах для числа Фруда. Для максимальных значений скорости жидкости и центробежной силы число Фруда имеет вид

$$Fr_R = \frac{\Omega^2 R^2}{\Omega^2 R (R - r_0)}. \qquad (10)$$

Это число Фруда всегда больше 1, и, следовательно, свободная поверхность ни в каких случаях не будет эксцентричной.

Число Фруда со средними по радиальному сечению значениями скорости жидкости и центробежной силы имеет вид

$$Fr_m = \frac{2}{3}\frac{R^3 - r_0^3}{\left(R^2 - r_0^2\right)\left(R - r_0\right)}. \qquad (11)$$

При такой формулировке бурный режим и отсутствие возмущений будут иметь место (из условия $Fr_m > 1$) при

$$r_0 > 0{,}29R, \quad \text{или} \quad R - r_0 < 0{,}71R. \qquad (12)$$

Этот критерий является средним между (9) и $r_0 = 0$, которое получается при использовании числа Фруда (10).

В любом случае в процессе затвердевания расплава от изложницы к оси вращения толщина расплавленного металла уменьшается, и поток в конце затвердевания согласно всем трем числам Фруда становится бурным, что обеспечит постоянную толщину стенок отливки. Уменьшение эксцентриситета свободной поверхности в процессе затвердевания и его стремление к нулю при окончании этого процесса, а как следствие, отсутствие разностенности у труб, установлены экспериментально и отмечены в [2]. Приведенные выше замечания поясняют гидравлическую сторону этого явления. Стремление к нулю эксцентриситета происходит не непрерывно, а дискретно: в момент, когда толщина расплавленного слоя над затвердевшей частью металла станет настолько малой, то в расплавленном слое возникнет бурное движение.

Если обозначить через r_s внутренний радиус затвердевшей части отливки, то при $r_s - r_0 < \frac{r_s}{2}$ режим движения расплавленного, еще не затвердевшего слоя станет бурным, что обеспечит отсутствие эксцентриситета свободной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные способы литья [Текст]: Справочник / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич [и др.]; под общ. ред. В.А. Ефимова.— Машиностроение, 1991.— 436 с.

2. **Гини, Э.И.** Технология литейного производства: Специальные виды литья [Текст]: Учебник для студ. высших учеб. заведений / Э.И. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин; под ред. В.А. Рыбкина.— М.: Изд. центр «Академия», 2005.— 352 с.

3. **Балуев, А.И.** Взаимосвязь сил, действующих на металл при производстве фасонных отливок центробежным методом. Вопросы судостроения [Текст] / А.И. Балуев, А.Д. Гиргидов, В.П. Голуб // Металлургия и сварка. Сер.8: Металлургия.— Вып. 4 (16).— Л.: Судостроение, 1973.— С. 137–142.

4. **Гиргидов, А.Д.** О расчете гидродинамического давления в системе охлаждения реактора турбогенератора [Текст] / А.Д. Гиргидов // Изв. вузов. Энергетика.— 1987. № 5.— С. 100–105.

5. **Гиргидов, А.Д.** Диссипация механической энергии в круглоцилиндрической трубе [Текст] / А.Д. Гиргидов // Инженерно-строительный журнал.— 2012. № 6.— С. 5–11.

6. **Гиргидов, А.Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст] / А.Д. Гиргидов.— СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007.—545 с.

7. **Гиргидов, А.Д.** Косые волны с точки зрения теории волн малой амплитуды [Текст] / А.Д. Гиргидов // Известия ВНИИГ им. Веденеева.— Т. 89. 1969.— С. 134–142.

ГИРГИДОВ Артур Давидович — *доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики инженерно-строительного института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812)552–64–01
hydravlika@cef.spbstu.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 681.784.3

Н.А. Грязнов, С.М. Панталеев, А.Е. Иванов,
Д.А. Кочкарёв, Д.С.Куликов

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

N.A. Grjaznov, S.M. Pantaleev, A.E. Ivanov,
D.A. Kochkarev, D.S. Kulikov

HIGH PERFORMANCE MEASUREMENT REFERENCE OBJECTS IN SPACE TO THE HYDRAULIC CENTRIFUGAL CASTING PIPES

Рассмотрены существующие подходы к лазерной локации и определены их основные недостатки. Предложен метод повышения производительности лазерной локации, базирующийся на использовании призменного сканирования, кодировании сигналов, в том числе спектрального, и применении матричного приема излучения.

ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ. ПРИЗМЕННОЕ СКАНИРОВАНИЕ. КООРДИНАТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ. МАТРИЧНЫЙ ПРИЕМНИК. КОДИРОВАНИЕ СИГНАЛА.

Analysis of existing approaches to laser location ensures revealing their main limitations. The suggested usage of prism scanning, signal coding, including the spectral one, and array detection of radiation provide increase of laser location performance.

LASER LOCATION. PRISM SCANNING. COORDINATE INFORMATION. ARRAY DETECTOR. SIGNAL CODING. SPECTRAL CODING.

Одним из наиболее активно развиваемых способов сбора координатной информации является лазерная локация. В сравнении с радиочастотными методами она выигрывает по угловому разрешению при сравнимых габаритах выходных апертур либо по массогабаритным параметрам при равных требованиях к разрешению. Тем не менее все активные методы зондирования обладают естественными ограничениями, связанными со скоростью распространения излучения.

В тех случаях, когда требования к скоростям обзора пространства не позволяют дожидаться возврата импульса зондирования с дистанции, соответствующей заданному рабочему диапазону системы, приходится изыскивать средства дифференциации сигналов. В оптической области эта ситуация усугубляется малыми полями зрения приемных детекторов и высокими требованиями к сохранению плоскостности поверхности элементов, обеспечивающих угловое сканирование.

Предлагаемый метод повышения производительности лазерной локации базируется на использовании призменного сканирования, кодирования сигналов, в том числе спектрального, и применении матричного приема излучения. Данный подход может быть использован в системах лазерной локации, измерительных лазерных комплексах, в устройствах обнаружения, сопровождения, наведения, технического зрения и навигации, работающих как в нормальных условиях, так и при высоком уровне помех, плохой видимости или отсутствии освещения. Он может применяться как самостоятельно, так и в сочетании с системами аналогичного назначения, функционирующими на базе других принципов.

Авторы работы [1] предложили способ видения подводных объектов, включающий управляемое сканирование зондирующим лазерным излучением с узкой диаграммой направленности в спектральной области прозрачности воды и регистрацию интенсивности излучения, отраженного от различных точек поверхности объекта,

посредством приемника с широкой или узкой диаграммой направленности. Восстановление двумерного образа объекта при такой локации происходит по показаниям датчиков системы сканирования за счет преобразования временной зависимости интенсивности отраженного излучения в координатную.

Подобный подход обладает существенными недостатками. Во-первых, не используется информация о третьей координате (дальность), содержащаяся во времени распространения лазерного импульса до объекта и обратно, в результате чего восстанавливается лишь двумерный, плоский образ объекта вместо трехмерного. Также не оправдано использование широкой диаграммы направленности приемника, ибо увеличивает интенсивность фоновой засветки и уменьшает помехозащищенность метода, ограничивая чувствительность детектора к отраженному сигналу. Для обеспечения большого диапазона по дальности функционирования использование подобного приемника потребует значительного увеличения мощности передатчика, что нерационально с точки зрения массогабаритных и энергетических параметров.

Более стандартный подход к лазерной локации подробно рассмотрен в монографии [2]. В ней предложен способ определения положения объекта на базе сканирующего лазерного дальномера, работающего по отраженному сигналу. Для зондирования пространства формируется импульс лазерного излучения заданной длительности, которая определяется требованиями к разрешению по дальности, и расходимости, определяемой требованиями к разрешению по угловым параметрам.

С помощью сканирующих средств обеспечивают развертку оптической оси приемопередающего тракта по двум угловым координатам и формируют текущее направление зондирования, фиксируемое датчиками системы сканирования для определения углового положения лоцируемых объектов. Время прихода излучения, диффузно отраженного от объекта, регистрируется приемной системой для вычисления временного интервала, прошедшего с момента испускания импульса зондирования, по которому определяется расстояние до объекта.

Недостаток классического способа лазерной локации, как было указан, связан с ограничением на максимальную частоту следования лазерных импульсов f при заданном диапазоне дальностей L, что не позволяет совместить высокую производительность обзора пространства с высоким угловым разрешением.

Это связано с неоднозначностью определения расстояния до лоцируемых объектов на частоте более $c/2L$ (c — скорость света в рабочей среде) в том случае, когда следующий импульс излучения посылается, не дожидаясь прихода отраженного сигнала с максимальной дальности. Учитывая тот факт, что современные лазерные излучатели способны реализовать угловую расходимость в доли миллирадиан при пиковой мощности импульса, обеспечивающей предельные дальности локационной системы в десятки километров, это ограничение — весьма существенно. Так, для максимальной дальности в 10 км, угловой расходимости в 1 мрад и поля зрения в 1 ср время полного обзора даже при оптимальной организации сканирования превышает одну минуту, что не позволяет говорить об оперативном сборе информации.

Задачей проведенной разработки было повышение производительности лазерной локации или сокращение времени обзора пространства при одновременном увеличении рабочей дальности и поля зрения с сохранением однозначности определения дальности до обнаруживаемых объектов. Для решения указанной задачи в первом варианте способа высокопроизводительной лазерной локации предлагается использовать матричный прием излучения, при котором каждому элементу линейки приемников соответствует свой поддиапазон расстояний до объекта.

Сканирование пространства во всех вариантах производится при помощи двух сканаторов, осуществляющих повороты совмещенных осей оптических пучков передающего и приемного каналов в ортогональных направлениях (рис. 1). В остальном алгоритм работы полностью аналогичен классическому способу лазерной локации, описанному выше.

Матричный прием излучения реализуется за счет равномерной и однонаправленной скорости строчной развертки, на несколько порядков (как минимум, более десяти раз) превышающей допустимые скорости кадровой развертки. В качестве примера подобных средств можно привести

зеркальный призменный дефлектор, число граней N которого определяется требуемым полем зрения локатора в данном направлении (не превышает $720°/N$).

Кадровая развертка может осуществляться сканаторами любого типа, обеспечивающими необходимые апертурные характеристики, диапазон и скорость развертки. Алгоритм сканирования в направлении, перпендикулярном направлению строчной развертки, позволяет в широких пределах варьировать размер зоны обзора, направление и плотность заполнения кадра.

Равномерная угловая скорость строчной развертки ω (при использовании зеркального призменного дефлектора она равна удвоенной скорости вращения) приводит к линейному по времени увеличению углового рассогласования между осью передающей и приемной систем $\Delta\alpha = \omega t$. При использовании частоты следования импульсов лазерного излучения f выше допустимой по критерию предельной дальности $c/2L$ введем понятие интервала однозначности по дальности — $s = c/2f$ (период однозначности по времени при этом составит $T = 1/f$).

Для решения проблемы неоднозначности определения дальности в этом случае используется линейка приемников с расстоянием между соседними приемниками d, не превышающим $F\omega/f$, где F — эффективное фокусное расстояние приемной системы (граничный вариант $d = F\omega/f$). Число приемников N выбирается таким образом, чтобы обеспечить требуемый диапазон дальностей, т. е. не менее $2LF\omega/cd$ (в граничном варианте — $N = 2Lf/c$). Первый приемник линейки, точнее, центр его стороны, максимально

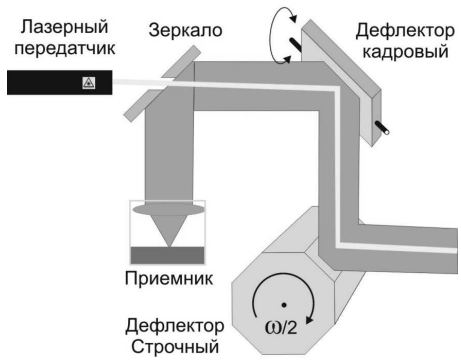


Рис. 1. Оптическая схема высокопроизводительного способа лазерной локации

удаленной от остальных приемников линейки, размещается на оси приемной системы, совпадающей с осью передающей системы, а последний ориентируется в направлении строчного сканирования (рис. 2).

Соответственно, на первый приемник приходит сигнал из ближней зоны, с расстояния, не превышающего интервал неоднозначности для выбранной частоты следования импульсов. На последний приемник сигнал приходит из дальней зоны с дистанции, отличающейся от максимальной дальности локации на расстояние, не превышающее интервал неоднозначности. Расчет дальности z осуществляется по формуле $z = cnd/2F\omega + c\Delta t/2$, где Δt — временной интервал между моментом генерации последнего импульса лазерного передатчика и моментом регистрации отраженного излучения, а n — номер приемника, на который поступил отраженный импульс.

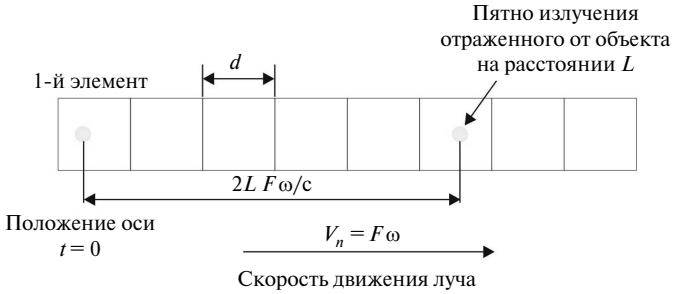


Рис. 2. Схема перемещения изображения объекта по линейке приемников в высокопроизводительном способе лазерной локации

Для случая, когда использование линейки приемников неоправданно затратно или неудобно с технической точки зрения, предлагается второй вариант высокопроизводительной лазерной локации с кодированием сигналов передатчика для устранения неоднозначности. Требуемая длительность последовательности неповторяющихся сигналов определяется отношением максимальной дальности к интервалу однозначности. Исключение ошибки, возникающей при отражении от объекта, находящегося за пределами рабочего диапазона дальностей, обеспечивается угловыми габаритами приемника, соответствующими смещению на максимальной дальности.

Кодирование сигналов осуществляется варьированием временной задержки между двумя импульсами, излучаемыми спектрально разнесенными лазерными генераторами и выведенными на общую оптическую ось передатчика с помощью дихроичного светоделителя. Аналогичным образом спектрально разделяются каналы приемной системы, в которой два приемника регистрируют времена прихода отраженных импульсов на соответствующих длинах волн излучения (рис. 3).

Определение дальности до объекта в этом случае осуществляется по формуле $z = c\Delta t/2$, где Δt — временной интервал между моментом генерации импульса на некой выбранной длине волны излучения из числа последних N импульсов, кодировка сигнала которого совпадает с кодировкой пришедшего сигнала, и моментом прихода отраженного излучения на той же длине волны.

В частном случае, когда класс объектов локации существенно ограничен по габаритам и скорости перемещения, с учетом того, что вероятностью появления двух объектов в зоне поиска можно пренебречь, алгоритм повышения производительности локации кодированием сигналов может быть упрощен до использования одного лазерного излучателя, генерирующего спаренные импульсы с варьируемым интервалом между ними, и одного приемника.

Таким частным случаем является лазерная локация в космическом пространстве, когда даже на нижних орбитах можно смело пренебречь вероятностью появления второго объекта на том же направлении сканирования, а габариты существующих объектов ограничены десятками метров. В этом случае можно задать минимальный временной интервал между зондирующими импульсами, превышающий 300 м, что обеспечит надежное разделение сигналов и их дифференциацию от результатов множественного отражения.

Дело в том, что самый крупный объект на нижней орбите, каковым является Международная космическая станция, не превышает 100 м по самой протяженной координате. Именно ее сложная архитектура и может приводить к разбиению импульса зондирования на несколько отраженных от разных элементов станции сигналов. Подобное ограничение по габаритам позволяет существенно упростить оптическую схему метода.

На рис. 4 приведена конструкция наземного макета для отработки технологии космической

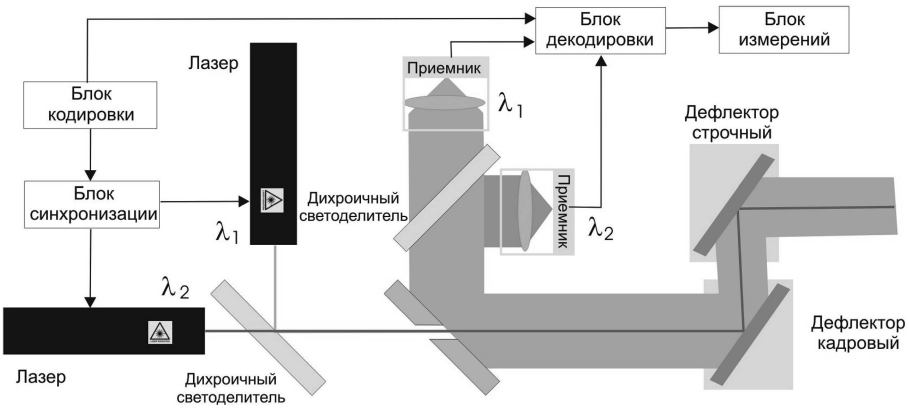


Рис. 3. Схема высокопроизводительного способа лазерной локации со спектральной кодировкой зондирующих импульсов

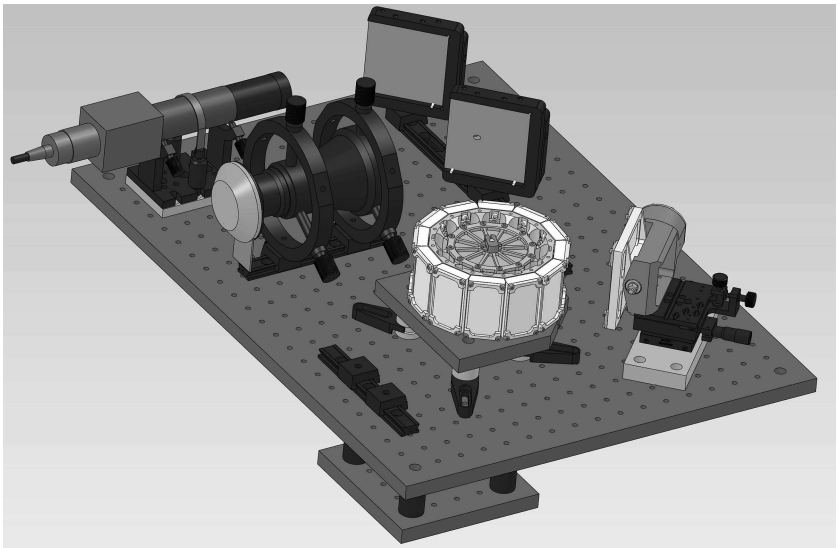


Рис. 4. Конструкция наземного макета космического варианта высокопроизводительного способа лазерной локации

лазерной локации, способной существенно повысить надежность определения относительных координат МКС и космических аппаратов, предполагающих осуществление стыковки как на стадиях подлета, маневрирования, так и на этапе сближения.

Подобный подход открывает широкие перспективы развития технологии лазерной локации, в том числе в области космической техники.

Однако эта система имеет свои существенные ограничения. Любой импульсный лазерный локатор имеет мертвую зону на малых расстояниях до объекта, обусловленную конечным временем распространения света и конечной длительностью лазерного импульса. Можно идти по пути уменьшения длительности импульса, но это серьезно усложняет систему, поскольку мощные лазеры со сверхкороткими импульсами находятся в стадии отработки прототипов. Их применение не снимает проблемы в целом, а просто уменьшает размеры мертвой зоны.

Другой возможный подход — использование малогабаритных лазерно-телевизионных систем, работающих на принципе триангуляции. Современное развитие техники позволяет уже сейчас строить системы с точностью определения координат в единицы мм на расстояниях 10 м в реальном масштабе времени. Комбинирование лазерного локатора и лазерно-теле-визионной системы определения координат объектов позволяет решить задачу стыковки в полном объеме без увеличения массогабаритных характеристик устройства.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта № 16.518.11.7054 от 12 мая 2011 г. по мероприятию 1.8 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы». В работе использовался лазерный трекер API Radian, входящий в состав оборудования ЦКП ЛОТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Патент РФ № 2397510.** Способ видения подводных объектов и устройство для его реализации [Текст] / В.В. Бузоверя [и др.].

2. **Матвеев, И.Н.** Лазерная локация [Текст] / И.Н. Матвеев, В.В. Протопопов, И.Н. Троицкий, Н.Д. Устинов.— М.: Машиностроение, 1984.— 272 с.

ГРЯЗНОВ Николай Анатольевич — *кандидат физико-математических наук, начальник научно-исследовательского отделения лазерных, оптоэлектронных и мехатронных систем федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, Россия
(812)-294-47-36
gna@rtc.ru

ПАНТАЛЕЕВ Стефан Милчев — *ведущий инженер 61 отдела федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, Россия
(812)-552–41–36
pantaleev@ltc.ru

ИВАНОВ Андрей Евгеньевич — *конструктор 63 отдела федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, Россия
(812)-552-41-36
a.ivanov@rtc.ru

КОЧКАРЁВ Дмитрий Алексеевич — *электроник научно-исследовательского отделения лазерных, оптоэлектронных и мехатронных систем федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Тихорецкий пр., 21 , Санкт-Петербург, Россия
(812)-552-45-21
kochdim83@mail.ru

КУЛИКОВ Дмитрий Сергеевич — *конструктор 63 отдела федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Тихорецкий пр., 21 , Санкт-Петербург, Россия
(812)-552-41-36
ds.koolikov@rtc.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.001.5:331.01

А.Г. Ташевский

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

A.G. Tashevsky

VERIFICATION TEST RESULTS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

В статье предлагается метод оценки числовых характеристик и параметров распределения наблюдаемых признаков по малому числу испытаний с целью подтверждения требований технического задания к показателям качества сложных изделий машиностроения.

АПРИОРНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ. СЛУЧАЙНАЯ ВЕЛИЧИНА. МАЛОЕ ЧИСЛО ИСПЫТАНИЙ. ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА. СЛОЖНЫЕ ИЗДЕЛИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ.

In article are offered a numerical method of assessing the characteristics and parameters of the distribution of the observed evidences in a small number of tests to confirm the requirements of technical specifications for the quality of complex products engineering.

A PRIORI AND EXPERIMENTAL DATA. THE LAW OF DISTRIBUTION. RANDOM VARIABLE. A SMALL NUMBER OF TESTS. THE REQUIREMENTS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS. QUALITY. COMPLEX PRODUCTS ENGINEERING.

Содержание проблемы

Сложность и высокая стоимость испытаний образцов новой техники (ОНТ) машиностроения (например, турбин) и энергетических комплексов, а также средств, обеспечивающих экспериментальную отработку объектов, сложность организационной структуры экспериментов, их малое количество и связанные с этим трудности перестройки экспериментов в процессе их реализации — все это делает необходимым широкое привлечение методов моделирования к натурным экспериментам и имеет цель получить результаты в ограниченное время из минимального объема экспериментальных данных. Установлено, что увеличение объема такого «сопровождающего моделирования» позволяет в 1,5–2 раза сократить число натурных экспериментов.

Обычно при моделировании сложных систем сталкиваются с ситуацией, когда исследуемые процессы в системе и условия внешней среды имеют вероятностный характер, а число факторов, действующих на оцениваемые показатели, — значительно, причем оценки искомых параметров нужно получить для широкого диапазона изменений параметров функционирования систем.

Используя обычные (классические) методы обработки результатов испытаний [1, 2] при их недостаточном количестве, можно получить оценки, но малой точности и надежности. Однако уже разработан ряд приемов и методов [3–5], позволяющих на основе имеющейся априорной информации о самых общих свойствах наблюдаемой случайной величины улучшить качество оценивания ее вероятностных характеристик при малом объеме выборки (числе испытаний).

Однородная выборка считается малой, если ее объем недостаточен для оценивания характеристики случайной величины с требуемой точностью и надежностью.

Объем испытаний, необходимый для подтверждения показателей надежности, сокращают разными путями: 1) форсированием режимов; 2) оценкой надежности по малому числу или отсутствию отказов; 3) сокращением числа образцов за счет увеличения длительности испытаний;

4) использованием разносторонней информации о надежности деталей и узлов машин.

Развивается подход к оцениванию по малому числу испытаний численных характеристик и параметров распределения наблюдаемых признаков с целью подтверждения требований, предъявленных в техническом задании к показателям качества. Он основан на использовании априорных и экспериментальных данных о законе распределения наблюдаемой случайной величины и учете вклада последних в информацию об истинном распределении случайной величины.

Приведем краткую формулировку общей задачи оценки качества образца новой техники.

Каждый испытываемый ОНТ обладает совокупностью (множеством) свойств, определяющих качество ОНТ применительно к его назначению. Каждое из свойств ОНТ может быть описано количественно с помощью некоторой переменной, значение которой и характеризует его качество относительно этого свойства. Эта переменная называется показателем свойства объекта. Качество объекта относительно его назначения характеризуется значениями совокупности показателей свойств, необходимых для достижения стоящей перед объектом задачи. Эта совокупность называется показателем качества ОНТ. Обобщенные абсолютные показатели свойств объекта, не зависящие (считающиеся таковыми) от условий, в которых он функционирует, используются при разработке его внутренней структуры и называются техническими показателями (техническими характеристиками — ТХ). Желаемое качество объекта задается условиями, которым должны удовлетворять значения показателей его качества. Эти условия называются критериями оценки качества объекта, а проверка их выполнимости — оцениванием качества объекта.

Набор показателей качества, подвергаемых оцениванию, содержится в технических требованиях (ТТ) и должен отражать лишь совокупность свойств объекта, существенных при оценивании степени его соответствия назначению и определяемых условиями его функционирования.

Множество критериев оценки качества объектов может быть разбито на три класса: критерии пригодности; критерии оптимальности; критерии превосходства.

Критерии оптимальности и превосходства представляют собой частные случаи критерия пригодности, по которому производится подтверждение технических требований к ОНТ посредством его испытаний.

Алгоритм подтверждения требований к ОНТ (оценивание показателей качества) по критерию пригодности включает следующие этапы:

определение (выявление) совокупности существенных свойств объекта;

определение значений показателей свойств и качества ОНТ;

установление связи между требованием и критерием, характеризующим исследуемое свойство или эффективность системы (выбор модельного распределения);

установление связи между оценками параметров требований и их истинными (заданными) значениями в зависимости от количества испытаний;

формирование (исходя из особенности модели и выбранных требований) статистики критерия, включая оценки параметров требований;

нахождение закона распределения статистики критерия в допускаемой (с определенным уровнем вероятности) области.

Наиболее характерными видами связи между ТТ и показателем эффективности системы являются нормальный закон распределения (НЗР), экспоненциальный закон распределения (ЭЗР) и гамма-распределения. Первому подчиняются характеристики точности, надежности, живучести; второму — характеристики безотказности и некоторые другие.

Следует подчеркнуть, что часто под оцениванием качества ОНТ понимают определение количественных характеристик качества, т. е. реализацию лишь первых двух этапов алгоритма. Такая схема проверки качества является разомкнутой, так как соответствующие ей этапы — подготовительные. Без реализации остальных этапов оценка качества ОНТ невозможна в принципе, ибо бессмысленно говорить о качестве, не предъявив к нему требований.

Методология решения задачи и основные расчетные зависимости

Общую методологию решения задачи подтверждения требования к качеству сложной технической системы рассмотрим на примере, в ко-

тором механизм формирования отклонений описывается НЗР.

Пусть $T_{\text{тр}}$ — заданное требование к качеству ОНТ, $\tilde{m}_t$ — его математическое ожидание, σ_t — среднее квадратическое отклонение (СКО), $\hat{m}$ — оценка, S_t — выборочное СКО.

Пусть заданный уровень критерия ОНТ зависит от характеристики и определяется следующим образом:

$$P_0 = \frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{T_{\text{тр}}} e^{-\frac{(t-\tilde{m}_t)^2}{2\sigma_t^2}}\, dt. \qquad (1)$$

С точки зрения задания требований условие (1) может быть представлено в виде

$$T_{\text{тр}} \geq \tilde{m}_t + \sigma_t u_{p_0}, \qquad (2)$$

где $T_{\text{тр}}$ — заданный уровень требования к качеству ОНТ; u_{p_0} — квантиль стандартного НЗР, соответствующий заданному уровню критерия качества P_0.

Если в результате проведения n испытаний получена оценка параметра $T_{\text{тр}}(\tilde{m}_t)$ и ее выборочное СКО (S_t), то для выборки из нормальной совокупности справедливы следующие соотношения, характеризующие связь оценки МО и выборочного СКО с числом проведенных испытаний:

$$\hat{m}_t = \tilde{m}_t + \sigma_t \frac{\eta}{\sqrt{n}}; \qquad (3)$$

$$S_t = \sigma_t \frac{\sqrt{\chi^2_{n-1}}}{\sqrt{n}}, \qquad (4)$$

где η — случайная величина, распределенная по стандартному НЗР — $N(0, 1)$; χ^2_{n-1} — случайная величина, распределенная по закону χ^2 с $n-1$ степенями свободы.

Тогда с учетом соотношений (3) и (4) условие (2) может быть представлено в общем случае так:

$$T_{\text{тр}} \geq \hat{m}_t - \frac{S_t\sqrt{n}}{\sqrt{\chi^2_{n-1}}}\frac{\eta}{\sqrt{n}} + \frac{S_t\sqrt{n}u_{p_0}}{\sqrt{\chi^2_{n-1}}},$$

или

$$T_{\text{тр}} \geq \hat{m}_t + \frac{S_t\sqrt{n}}{\sqrt{\chi^2_{n-1}}}\left(u_{p_o} - \frac{\eta}{\sqrt{n}}\right). \qquad (5)$$

Для формирования статистики критерия представляется целесообразным в зависимости (5) выделить заданные и получаемые в результате испытаний характеристики.

После проведения простых преобразований получаем соотношение

$$\frac{T_{\text{тр}} - \tilde{m}_t}{S_t u_{p_0}\sqrt{n}} \geq \frac{1}{\sqrt{\chi^2_{n-1}}} - \frac{1}{u_{p_0}\sqrt{n(n-1)}} t_{n-1}. \qquad (6)$$

Для вывода условия (6) использовалось известное в математической статистике соотношение [7]

$$\frac{\eta}{\sqrt{\chi^2_{n-1}}} \sim \frac{t_{n-1}}{\sqrt{n-1}} \qquad (7)$$

(отношение $\frac{\eta\sqrt{n-1}}{\sqrt{\chi^2_{n-1}}}$ распределено по закону Стьюдента с $n-1$ степенями свободы). Таким образом, статистика критерия $\frac{T^{TP} - \tilde{m}_t}{S_t u_{p_0}\sqrt{n}}$ распределена по закону, получаемому в результате композиции двух случайных величин: $\frac{1}{\sqrt{\chi^2_{n-1}}}$ и $\frac{t_{n-1}}{u_{p_0}\sqrt{n(n-1)}}$.

Введем обозначение статистики критерия:

$$\tau = \frac{T_{\text{тр}} - \tilde{m}_t}{S_t u_{p_0}\sqrt{n}}. \qquad (8)$$

Статистика критерия τ распределена по закону (доказательство теоремы приведено в [4]), плотность распределения которого имеет следующий вид:

$$f(\tau) = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)u_{p_0}\sqrt{n}}{2^{\frac{n-2}{2}}\cdots\left[\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]^2}\frac{(n-3)!!}{\left[1+u_{p_0}^2 n\tau^2\right]^{\frac{n}{2}}} +$$

$$+\frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)u_{p_0}\sqrt{n}}{2^{\frac{n-3}{2}}\sqrt{\pi}\left[\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]^2}\times$$

$$\times\int_0^\infty \xi^{-n} e^{-\frac{1}{2\xi^2}}\left[1+u_{p_0}^2 n(\xi-\tau)^2\right]^{-\frac{n}{2}} d\xi \qquad (9)$$

при четном n;

$$f(\tau) = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)u_{p_0}\sqrt{n}\left(\frac{n-3}{2}\right)!}{\sqrt{\pi}\left[\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]^2\left[1+u_{p_0}^2 n\tau^2\right]^{\frac{n}{2}}} +$$

$$+\frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)u_{p_0}\sqrt{n}}{2^{\frac{n-3}{2}}\sqrt{\pi}\left[\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]^2}\times$$

$$\times\int_0^{\infty}\xi^{-n}e^{-\frac{1}{2\xi^2}}\left[1+u_{p_0}^2n(\xi-\tau)^2\right]^{-\frac{n}{2}}d\xi \qquad (10)$$

при нечетном n.

Чтобы проверить гипотезу о принадлежности расчетного значения критерия τ критической или допустимой области, необходимо произвести расчет значений функции распределения статистики критерия τ:

$$F(\tau)=\frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)u_{p_0}\sqrt{n}(n-3)!!}{2^{\frac{n-3}{2}}\left[\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]^2}a^n\times$$

$$\times\left[\frac{\tau_p}{2N-1}\sum_{k=1}^{N-1}\frac{(2N-1)(2N-3)...(2N-2k+1)}{2^k(N-1)(N-2)...(N-k)a^{2k}\left(\tau_p^2+a^2\right)^{n-k}}+\right.$$

$$\left.+\frac{(2N-3)!}{2^{n-1}(N-1)!a^{2N-1}}\operatorname{arctg}\frac{\tau_p}{a}\right]+$$

$$+\frac{2^{\frac{3-n}{2}}\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)u_{p_o}\sqrt{n}}{\sqrt{\pi}\left[\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]^2}\times$$

$$\times\int_0^{\tau_p}\int_0^{\infty}\xi^{-n}e^{-\frac{1}{2\xi^2}}\left[1+u_{p_0}^2n(\xi-\tau)^2\right]^{-\frac{n}{2}}d\xi d\tau \qquad (11)$$

для четного n, $N=\frac{n}{2}$, $a=\frac{1}{u_{p_0}\sqrt{n}}$;

$$F(\tau)=\frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)u_{p_0}\sqrt{n}\left(\frac{n-3}{2}\right)!}{\sqrt{\pi}\left[\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]^2}a^n\times$$

$$\times\left\{\frac{\tau_p\left(\tau_p^2+a^2\right)^{\frac{1}{2}}}{(2N1-1)a^2}\left[\frac{1}{\left(\tau_p^2+a^2\right)^{N1}}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\sum_{k=1}^{N1-1}\frac{2^k(N1-1)(N1-2)...(N1-k)}{(2N1-3)(2N1-5)...(2N1-2k-1)}\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times\frac{1}{a^{2k}\left(\tau^2+a^2\right)^{N1-k}}\right]\right\}+\frac{2^{\frac{3-n}{2}}\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)u_{p_o}\sqrt{n}}{\sqrt{\pi}\left[\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]^2}\times$$

$$\times\int_0^{\tau_p}\int_0^{\infty}\xi^{-n}e^{-\frac{1}{2\xi^2}}\left[1+u_{p_0}^2n(\xi-\tau)^2\right]^{-\frac{n}{2}}d\xi d\tau \qquad (12)$$

для нечетного n, $N1=\frac{n-1}{2}$, $a=\frac{1}{u_{p_0}\sqrt{n}}$.

Таким образом, для подтверждения требований по малому числу испытаний достаточно рассчитать $\hat{m}_t$, S_t.

В табл. 1–4 из [6] представлены значения функции распределения $F(\tau)$ статистики критерия τ и ее плотности $f(\tau)$ для целочисленных параметров n.

По уровню квантиля P_0 и α определяется значение $\tau_{\text{кр}}(\alpha, n, u_{p_0})$ по табл. 2 из [6], а затем решается неравенство

$$\hat{m}\geq T_{\text{тр}}+S_t u_{p_0}\sqrt{n}\,\tau_{\text{кр}}(\alpha, n, u_{p_o}). \qquad (13)$$

Выражение (13) получено из (6) и показывает, что если оценка математического ожидания, когда n мало, будет больше заданного требования к технической системе, увеличенного на комплекс, характеризующий степень доверия (риска) и малую выборку, то требование считается подтвержденным. Это обстоятельство наглядно иллюстрирует рис. 1.

В табл. 3, 4 из [6] приведены значения плотности $\varphi(\tau)$ и функции распределения статистики критерия τ для частного случая, когда математическое ожидание НЗР известно.

Входами в табл. 2 и 4 работы [6] являются: число испытаний (объем выборки) n, квантиль стандартного НЗР, соответствующий уровню критерия P_0, и значение уровня подтверждения α. Расчеты проводились численными методами.

Пример решения задачи

Рассмотрим пример решения задачи по определению числа испытаний, подтверждающих надежность изделия. Необходимо по трем испытаниям ($n = 3$) сделать вывод о выполнимости требований по безотказности сложной технической системы при уровне значимости $\alpha = 1$. Задана вероятность безотказного функци-

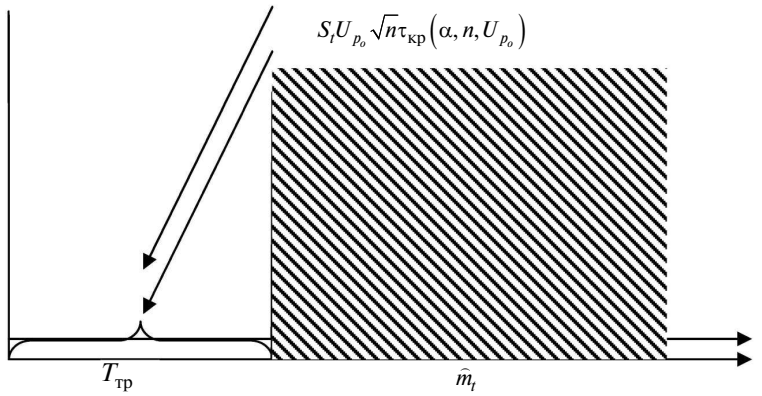


Рис. 1. Подтверждение требования $T_{\text{тр}}$, когда n мало.

онирования системы $P_0 = 0{,}9$ на периоде времени $T_{\text{тр}} = 22 \cdot 10^3$ ч. Закон распределения времени безотказной работы — нормальный, параметры закона неизвестны. В результате испытаний получено время работы системы до первого отказа $T_1 = 28{,}5 \cdot 10^3$ ч; $T_2 = 30 \cdot 10^3$ ч; $T_3 = 27 \cdot 10^3$ ч.

Решение. Находим оценку математического ожидания и выборочного СКО времени наработки до отказа:

$$\hat{m}_t = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{n} = \frac{28{,}5 + 30 + 27}{3} 10^3 \text{ ч};$$

$$S_t = \sqrt{\frac{\left(\hat{m}_t - T_1\right) + \left(\hat{m}_t - T_2\right) + \left(\hat{m}_t - T_3\right)^2}{n-1}} = 1{,}5 \cdot 10^3 \text{ ч};$$

по табл. 2 определяется $\tau_{\text{кр}}\left(\alpha, n, u_{p_0}\right)$ — $\tau_{\text{кр}} = 1{,}57576$.

По неравенству (13) $\hat{m}_t \geq T_{\text{тр}} + S_t u_{p_0} \sqrt{n} \tau_{\text{кр}}\left(\alpha, n, u_{p_o}\right)$ проверяется выполнимость требования к $T_{\text{тр}}$: $28{,}5 \geq 22 + 1{,}5 \times 1{,}28155 \sqrt{3 \cdot 1{,}57576} = 27{,}24659$.

Следовательно, проведенные испытания подтверждают заданное требование.

Частным случаем решения задачи подтверждения требований к качеству сложной технической системы является случай, когда механизм формирования отклонений истинных значений требований от реальных аппроксимируется *нормальным законом*, математическое ожидание $\hat{m}_t$ которого известно. В этом случае условие (2) может быть представлено в виде

$$T_{\text{тр}} \geq \tilde{m}_t + \frac{S_t \sqrt{n}}{\sqrt{\chi^2_{n-1}}}. \qquad (14)$$

После проведения преобразований получаем соотношение

$$\frac{T_{\text{тр}} - \tilde{m}_t}{S_t u_{p_0} \sqrt{n}} \geq \frac{1}{\sqrt{\chi^2_{n-1}}}. \qquad (15)$$

Для вывода условия (15) использовалось известное в математической статистике соотношение (4).

Таким образом, комплекс случайных величин в левой части этого выражения распределен по закону χ^2 с $n-1$ степенями свободы.

Введем обозначение статистики критерия: $\tau = \dfrac{T_{\text{тр}} - \tilde{m}_t}{S_t u_{p_0} \sqrt{n}}$.

Статистика критерия τ распределена по закону (доказательство теоремы приведено в [4]), плотность которого

$$\varphi(\tau) = \frac{1}{2^{\frac{n-3}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \tau^{-n} e^{-\frac{1}{2\tau^2}}. \qquad (16)$$

Расчет значений функции распределения статистики критерия проводился по выражению

$$\Phi(\tau) = \tau_{\text{кр}\,\alpha} = \int_0^{\tau} \frac{1}{2^{\frac{n-3}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \tau^{-n} e^{-\frac{1}{2\tau^2}} d\tau.$$

Результаты расчетов плотности $\varphi(\tau)$ и функции распределения $\Phi(\tau)$ приведены в табл. 3, 4 из [6].

Задачи подтверждения требований к качеству сложной технической системы, когда механизм формирования отклонений истинных зна-

чений требования от реальных проявляется в виде *экспоненциального закона* распределения, решается следующим образом. Пусть $T_{тр}$ — заданное требование к качеству ОНТ. В результате испытаний получены частные значения требования t_1, t_2, ..., t_n. Если они будут распределены по экспоненциальному закону, плотность которого

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda t}, \qquad (17)$$

где $\lambda=\frac{1}{\tilde{m}_t}$ ($\tilde{m}_t$ — математическое ожидание), для которого характеристическая функция имеет вид

$$\theta_1(V)=\frac{1}{1-iV\,\tilde{m}_t}, \qquad (18)$$

то сумма экспериментальных значений $\sum_{i=1}^{n} t_i$ распределена по закону, характеристическая функция которого представляет собой n произведений характеристической функции (18):

$$\theta_2(V)=\frac{1}{(1-iV\,\tilde{m}_t)^n}. \qquad (19)$$

Математическое ожидание связано с задаваемым уровнем P_0 и $T_{тр}$ соотношением

$$P_0=1-e^{-\lambda t}, \qquad (20)$$

откуда

$$\tilde{m}_t=\frac{T}{\ln\frac{1}{1-P_0}}. \qquad (21)$$

Известно свойство характеристической функцией: если $\theta(V)$ — характеристическая функция распределения $F(t)$, то характеристической функцией для $F\left(\frac{t}{a}\right)$ является $\theta(aV)$. В силу этого можно подобрать такой коэффициент a, чтобы характеристическая функция получаемого комплекса (статистика) была инвентарной относительно неизвестных данных $\tilde{m}_t$ или задаваемых характеристик P_0 и $T_{тр}$.

Нетрудно заметить, что в рассматриваемой задаче таким коэффициентом является

$$a=\frac{1}{T_{тр}}\ln\frac{1}{1-P_0}. \qquad (22)$$

Тогда статистика

$$\tau=\frac{\sum_{t=1}^{n} t_i T_{тр}}{\ln\frac{1}{1-P_0}}=\frac{\tilde{m}_t}{T_{тр}}\ln\frac{1}{(1-P_0)^n} \qquad (23)$$

распределена по закону, характеристическая функция которого имеет вид

$$\theta_3(V)=\frac{1}{(1-iV)^n}. \qquad (24)$$

Данной характеристической функции соответствует гамма-распределение

$$f(\tau)=\frac{\tau^{n-1}e^{-\tau}}{\Gamma(n)}. \qquad (25)$$

При больших значениях n закон распределения статистики τ будет нормальным.

Заданные требования будут выполняться при уровне значимости α, если выполняется условие $\tau_{расч} > \tau_{кр\,\alpha}$, т. е.

$$\frac{\hat{m}_t}{T_{тр}}\ln\frac{1}{\sqrt[n]{1-P_0}} > \tau_{кр\,\alpha}, \qquad (26)$$

или

$$P_{кр\,\alpha}=\int_0^{\tau_{расч}}\frac{1}{\Gamma(n)}\tau^{n-1}e^{-\tau}d\tau. \qquad (27)$$

Для решения задачи подтверждения требования вводим в рассмотрение статистику критерия:

$$\tau=\frac{\hat{m}_t}{T_{тр}}\ln\frac{1}{(1-P_0)^n}. \qquad (28)$$

Она распределена по закону гамма-распределения с плотностью

$$f(\tau)=\frac{1}{\Gamma(n)}\tau^{n-1}e^{-\tau}. \qquad (29)$$

Задача сводится к проверке гипотезы о принадлежности расчетного значения критерия τ критической (допустимой) области (рис. 2).

Используя результаты работы [3], можно показать, что критическая область для статистики τ будет определяться зависимостью

$$\tau_{кр\,\alpha}=$$

$$=\sum_{\nu=0}^{\nu^*}\frac{(\alpha-F_0)^\nu}{\nu!}\times$$

$$\times\left[\left[\Gamma(n)\right]^\nu(n-1)^{1-\nu n}e^{\nu(n-1)}\psi_{\nu+1}(\tau)\right]_{\tau_0=n-1}+$$

$$+\frac{(\alpha-F_0)^{\nu^*+1}(n-1)^{1-\nu^* n}e^{(\nu^*+1)(n-1)}\left[\Gamma(n)\right]^{\nu^*+1}}{(\nu^*+1)!\left[1-\frac{\Gamma(n)}{(n-1)^n e^{n-1}(\alpha-F_0)}\right]}, \quad (30)$$

где $F_0=\int_0^{n-1}\frac{1}{\Gamma(n)}\tau^{n-1}e^{-\tau}\alpha\tau$;

$$\psi_{\nu+1}(\tau)=\tau\dot{\psi}_\nu(\tau)+(1-\nu\, n+\nu\,\tau)\psi_\nu(\tau);$$

$$\psi(\tau)=1. \quad (31)$$

Пример. Известно, что закон изменения времени безотказной работы технической системы — экспоненциальный, наработка на отказ $\tilde{m}_t$ = =1100 ч. Задано, что на периоде времени $T_{тр}=1800$ ч вероятность безотказной работы должна быть $P_0=0{,}8$. В результате проведенных испытаний ($n=3$) получена оценка среднего времени безотказной работы технической системы $\hat{m}_t=2800$ ч.

Необходимо сделать вывод о выполнимости задаваемых требований по безотказности системы.

Решение. 1. По зависимости (28) определяется расчетное значение критерия

$$\tau_{расч}=\frac{2850}{1800}\ln\frac{1}{(1-0{,}8)^3}=7{,}64.$$

Используя зависимости (30), (31), производим расчет критического значения критерия

$$F_0=\int_0^2\frac{1}{\Gamma(3)}\tau^2e^{-\tau}d\tau.$$

Данный интеграл при $n=3$ может быть определен в результате последовательного интегрирования по частям. Численные значения его приведены в таблицах [8]. Тогда $F_0=1-P(4{,}6)=$ $=0{,}32332$; $\alpha-F_0=-0{,}27332$.

Фиксируем $\nu=6$, так как из опыта расчета подобных рядов известно, что члены искомого ряда более высокого порядка вносят малую погрешность вычисления.

Рассчитываем значения функции $\psi_\nu(\tau)$ для $\nu=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Получаем $\psi_0=1$, $\psi_1=1$, $\psi_2=0$, $\psi_3=2$, $\psi_4=-4$, $\psi_5=40$, $\psi_6=-264$.

Производим расчет $\tau_{кр\,\alpha}$ по выражению (30):

$$\tau_{кр\,\alpha}=2-1{,}01+0-0{,}086-0{,}022-$$
$$-0{,}012-0{,}0000022=0{,}848.$$

Таким образом $\tau_{расч}>\tau_{кр\,\alpha}$ при данном уровне значимости ($\alpha=0{,}05$). Выдвинутые требования выполняются.

Решим задачу иначе. При второй постановке данной задачи достаточно рассчитать $P_{кр}$ по зависимости (27) с помощью таблиц математической статистики [8]:

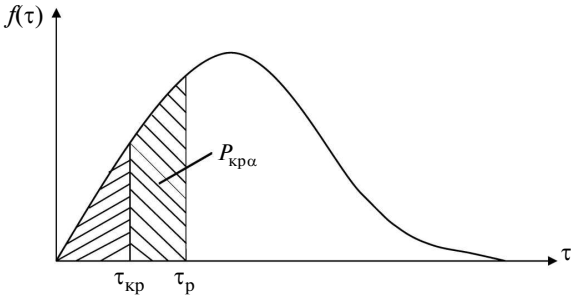


Рис. 2. Функция распределения статистики критерия τ. Проверка гипотезы

$$P_{кр}=\int_0^{7{,}64}\frac{1}{2}\tau^2e^{-\tau}d\tau=1-P(1{,}7;6)=0{,}055.$$

Для случая, когда закон изменения требования к показателю качества описывается гамма-распределением, плотность которого имеет вид

$$f(t)=(\lambda t)^{m-1}e^{-\lambda t}\lambda\frac{1}{\Gamma(m)}, \quad (32)$$

вывод аналитической зависимости для расчета критической области производится аналогично, по ранее описанной схеме:

$$\tau_{кр\,\alpha}=n\frac{\hat{m}_t}{T_{m-1}}\times$$
$$\times\sum_{\nu=0}^{\infty}\frac{[P_0-F_0]^\nu}{\nu!}\Gamma(m)(m-1)^{1-\nu\, m}e^{\nu(m-1)}\psi_1(t)\Big|_{t=m-1}, \quad (33)$$

где $F_0=\int_0^{m-1}\frac{1}{\Gamma(m)}t^{m-1}e^{-t}dt$;

$$\psi_{\nu+1}(t)=t\dot{\psi}_\nu(t)+(1-\nu\, n+\nu\, t)\psi_\nu(t);\ \ \psi_1(t)=1.$$

Плотность распределения статистики критерия $f(\tau)$ имеет вид

$$f(\tau)=\frac{1}{\Gamma(mn)}\tau^{(mn-1)}e^{-\tau}. \quad (34)$$

В настоящей работе предложен метод, основанный на использовании априорных и экспериментальных данных о законе распределения наблюдаемой случайной величины и учете вклада последних в информацию об истинном распределении случайной величины.

Это позволяет оценивать числовые характеристики и параметры распределения наблюдаемых признаков по малому числу испытаний и использовать это для подтверждения требований технического задания к показателям качества сложных изделий машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баклашов, Н.И.** Научный эксперимент [Текст] / Н.И. Баклашов, А.Н. Белюнов [и др.].— М: Радио и связь, 1982.— 304 с.

2. **Вентцель, Е.С.** Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель.— М.: Физматгиз, 1962.— 564 с.

3. **Мартыщенко, Л.А.** Методы военно-научных исследований в задачах разработки и испытания вооружения: Ч. 1 [Текст] / Л.А. Мартыщенко, В.В. Панов / МО СССР.— М.: Наука, 1983.— 415 с.

4. **Мартыщенко, Л.А.** Подтверждение ТТХ сложных систем по малому числу испытаний [Текст] / Л.А. Мартыщенко, А.Г. Ташевский, В.И. Немчинов // МО СССР.— 1985.— 48 с.

5. **Мартыщенко, Л.А.** Проблема Беренса — Фишера и ее приложение к сравнению результатов статистического моделирования и натурных испытаний сложных систем [Текст] / Л.А. Мартыщенко / МО СССР.— 1983.— 15 с.

6. **Ташевский, А.Г.** Метод оценки надежности сложных изделий энергомашиностроения при ограниченном числе испытаний [Текст] / А.Г. Ташевский // Труды Санкт-Петербургского института машиностроения. Вып. 2. – СПб.,1996. – 96с.

7. **Пискунов, Н.С.** Дифференциальное интегральное исчисление [Текст] / Н.С. Пискунов.— М.: Физматгиз, 1960.— 747 с.

8. **Большев, Л.Н.** Таблицы математической статистики [Текст] / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов.— М.: Наука, 1983.— 415 с.

9. **Ташевский, А.Г.** Интерпретация результатов испытаний после модернизации систем энергомашиностроения [Текст] / А.Г. Ташевский // Инструмент и технологии.— 2012. № 36.— С. 34–39.

ТАШЕВСКИЙ Арнольд Германович — *доктор технических наук, профессор института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.*
195197, Полюстровский пр., д. 14, Санкт-Петербург, Россия
taarnold@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.791.754.4

А.И. Ковалевский

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

A.I. Kovalevsky

IMPROVEMENT TECHNOLOGY CONSUMABLE ELECTRODE WELDING

В статье описан разработанный преобразователь электрических колебаний в механические, позволяющий при сварке в среде углекислого газа организовать принудительный мелкокапельный перенос электродного металла без коротких замыканий дугового промежутка и разбрызгивания. Показано, что использование преобразователя при сварке снижает коэффициент потерь электродного металла на 40–50 % по сравнению со сваркой без преобразователя.

ПРИНУДИТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС. АВТОМАТИЧЕСКАЯ. ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА. РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ. АМПЛИТУДА.

The article describes the designed device for the conversion of electrical oscillations into mechanical oscillations that allows organizing the forced transfer of electrode metal without short circuit in the arc space and metal splatter in the process of carbon dioxide welding. It is shown that using the converter during welding decreases the electrode metal loss coefficient by 40–50 % compared to welding without the converter.

FORCED TRANSFER. AUTOMATIC. SEMIAUTOMATIC CARBON DIOXIDE WELDING. RESONANT OSCILLATION FREQUENCY. AMPLITUDE.

Полуавтоматическая сварка в среде углекислого газа имеет ряд преимуществ: высокую производительность, маневренность, низкую стоимость сварочных материалов. Однако, наряду с преимуществами, этот вид сварки имеет существенный недостаток — повышенное разбрызгивание электродного металла. В зависимости от диаметра электрода и параметров режима сварки потери металла на разбрызгивание могут доходить до 30 % [1, 2]. Набрызгивание на поверхности свариваемых изделий приводит к увеличению трудоемкости операции очистки этих поверхностей от брызг расплавленного металла на 30–40 % [3], дополнительному расходу инструментов и электроэнергии. Забрызгивание газоподводящего сопла горелки ухудшает защиту зоны сварки и приводит к образованию пор в металле шва.

Для снижения потерь электродного металла при сварке в среде углекислого газа используется механический сброс капли с торца электрода [4]. Этот механизм имеет достаточный ресурс работы, а также специфические особенности по формированию импульсов определенных параметров, однако конструкции этого типа механизмов импульсной подачи электродной проволоки имеют ограничения относительно формирования импульсов с заданными необходимыми параметрами, они связаны с используемыми в данных механизмах техническими решениями.

В способе сварки, предложенном немецкой фирмой «Fronius» [5], результат достигается модуляцией скорости подачи электрода за счет накопительного буфера и двух механизмов подачи. Недостатком этого способа является то, что накопительный буфер находится слишком далеко от сварочной горелки, из-за чего необходимо преодолевать дополнительную силу инерции, поэтому сварочная система становится более громоздкой. Для контроля эффективного управления током короткого замыкания необходим специальный инверторный источник питания.

Для повышения частоты с целью обеспечения принудительного мелкокапельного переноса электродного металла без коротких замыканий было разработано устройство (патент Украины № 84237) схема которого представлена на рис. 1.

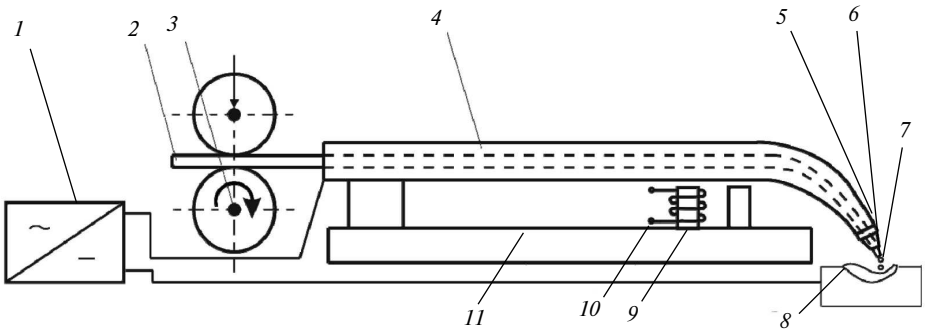


Рис. 1. Схема преобразователя электрических колебаний в механические

Дуга питается от сварочного выпрямителя *1*. Электрод *2* подается роликами *3* в канал верхней ветви *4* преобразователя. В колеблющийся конец ветви ввинчен мундштук *5*. Вместе с ним колеблется торец электрода *6*, он сбрасывает каплю *7* в сварочную ванну *8*. Магнитопровод *9* и обмотка *10* закреплены на нижней ветви преобразователя *11*. При подаче импульсного тока в обмотку *10* магнитопровод *9* возбуждает колебания верхней и нижней частей преобразователя в противофазе. Ветви преобразователя изготовлены из пружинной стали 65Г2С с целью обеспечения упругих колебаний. Собственная частота колебаний преобразователя зависит от геометрических размеров ветви и свойств материала.

При движении торца электрода в сторону сварочной ванны скорость движения капли жидкого металла в эту же сторону увеличивается, при обратном движении торца электрода капля, двигаясь по инерции, отрывается от электрода и переходит в сварочную ванну.

С помощью приводного и прижимного роликов в устройство подают электродную проволоку марки Св-08Г2С диаметром 0,8–1,6 мм. На дугу подают напряжение 18–30 В от источника питания дуги, ток дуги составляет 50–120 А. В зону сварки подают защитную среду — газ CO_2. Затем с помощью механического колебательного контура задают режим колебания проволоки, амплитуда колебаний составляет 0,2–0,6 мм. При этом за счет принудительного сбрасывания капли с торца электрода, осуществляемого с регулируемой частотой, происходит мелкокапельный перенос.

С ростом частоты колебаний торца электрода уменьшается диаметр капли, и, когда он становится меньше длины дуги, короткие замыкания не происходят, разбрызгивание уменьшается. Более подробно это устройство описано в работе [6].

Для определения амплитуды, которая создается при воздействии на верхнюю ветвь преобразователя, исследована зависимость амплитуды конца верхней ветви преобразователя от резонансной частоты колебаний торца электрода.

Амплитуду колебаний измеряли оптическим способом, используя микроскоп со шкалой точностью 0,1 мм. Частота регулировалась в пределах от 125 до 350 Гц. Увеличение частоты достигалось уменьшением длины колеблющихся ветвей преобразователя.

Полученные амплитудно-частотные характеристики представлены на рис. 2

Установлено, что резонансная частота увеличивается, а амплитуда уменьшается при увеличении частоты колебаний. Определены резонансные частоты для каждой длины ветвей преобразователя. Резонансные частоты оказались следующими: при длине ветви 150 мм — 145 Гц, при 125 мм — 210 Гц, при 110 мм — 220 Гц, при 100 мм — 265 Гц.

Далее исследовалось влияние напряжения дуги на коэффициент потерь при токе 80 А без колебаний электрода ($f = 0$ Гц) и с колебаниями ($f = 265$ Гц) (рис. 3, *а*), а также влияние тока дуги на коэффициент потерь в интервале 50–120 А при напряжении 18 В на различных резонансных частотах (рис. 3, *б*).

Установлено:

увеличение напряжения при постоянной силе тока приводит к росту потерь как при использовании преобразователя, так и без него. Использование преобразователя на резонансной частоте 265 Гц снижает коэффициент потерь практически в два раза;

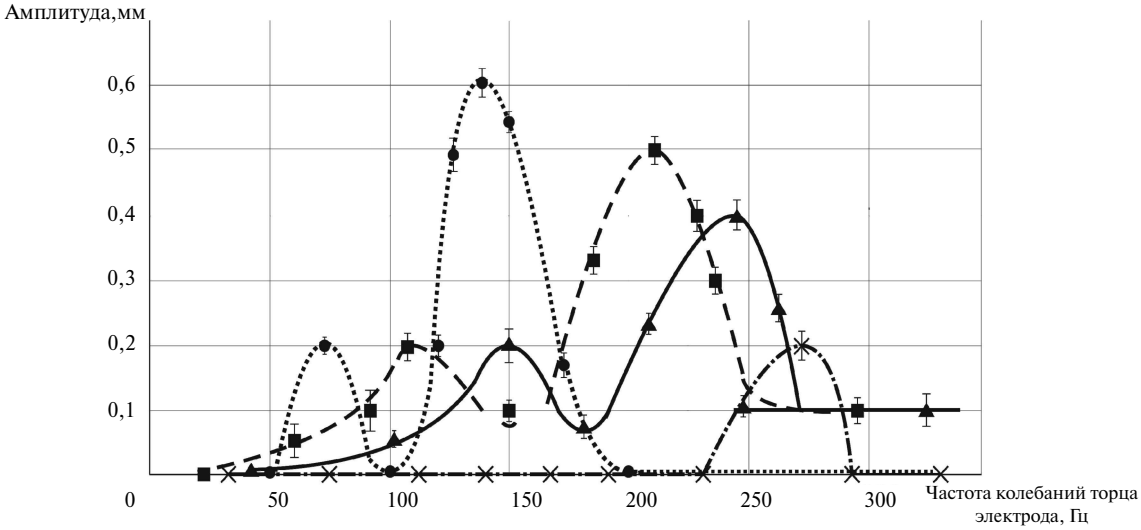


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики преобразователя при различных длинах *L* ветвей:
— 150 мм; — 125 мм; — 110 мм; — 100 мм

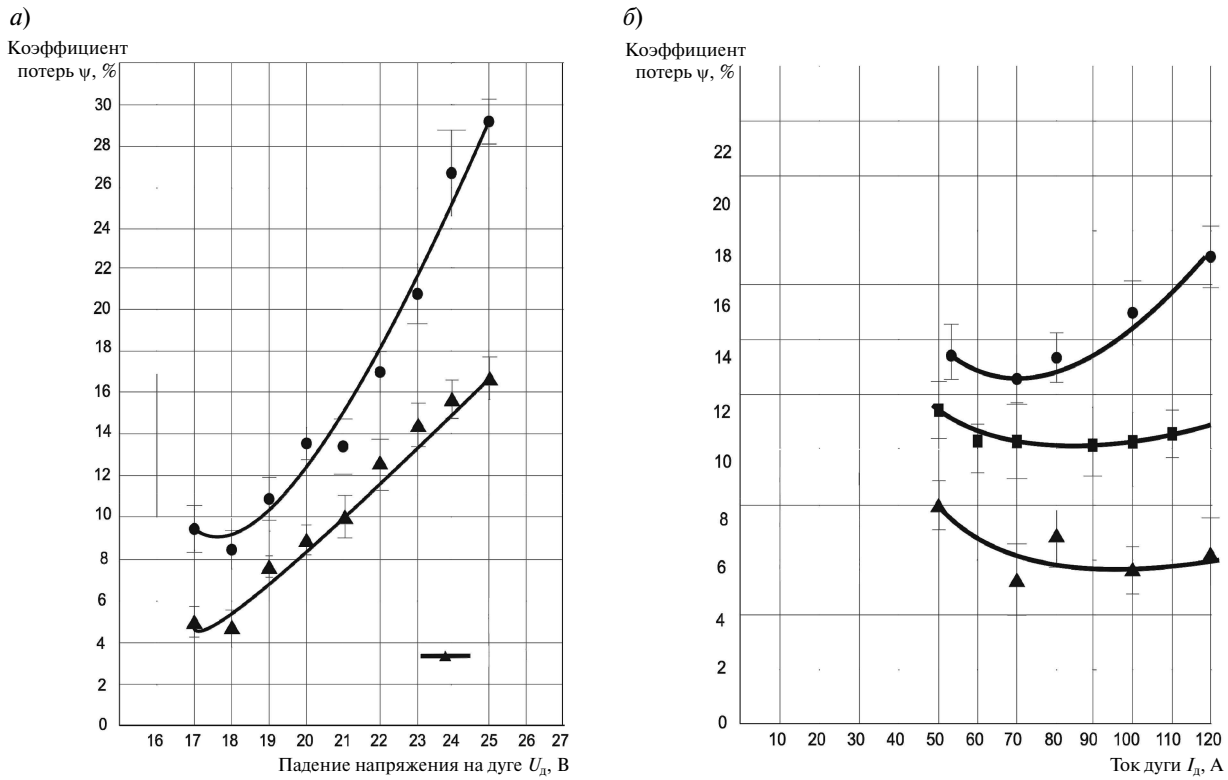


Рис. 3. Зависимость коэффициента потерь от тока дуги (*а*) и зависимость коэффициента потерь от напряжения на дуге (*б*) при разных значениях частоты *f* колебаний электрода:
— *f* = 0 Гц; — *f* = 22 Гц; — *f* = 265 Гц;

повышение тока дуги при постоянном напряжении приводит к росту коэффициента потерь при сварке без колебаний. Использование преобразователя позволяет увеличивать силу тока без повышения потерь электродного металла;

потери снижаются с увеличением резонансной частоты. Так, при резонансной частоте 265 Гц коэффициент потерь снижается практически в два раза по сравнению со сваркой без колебаний.

Зависимости коэффициента потерь электродного металла от частоты исследовали на токах 40, 70 и 110 А при напряжении 18 В; электрод марки Св08Г2С. Результаты экспериментов представлены на рис. 4

Минимумы потерь наблюдаются, когда резонансная частота преобразователя равна 265 Гц. При резонансной частоте 227 Гц амплитуда колебаний больше чем при частоте 265 Гц, но перенос капель происходит с короткими замыканиями дугового промежутка и повышенными потерями. Оптимальной является резонансная частота 265 Гц, когда капля переходит без коротких замыканий, а амплитуда достаточна для ее переноса. При резонансной частоте 300–350 Гц амплитуда колебаний торца электрода становится недостаточной для сброса капли, что приводит к росту диаметра капли, коротким замыканиям дугового промежутка и увеличению коэффициента потерь.

Зависимости, полученные в ходе экспериментов, показывают, что при повышении частоты до 265 Гц коэффициент потерь снижается, однако при увеличении частоты свыше 265 Гц коэффициент потерь резко увеличивается и эффект становится незаметным. Это связано с тем, что при увеличении частоты снижается амплитуда, и капля не отрывается от торца электрода, что приводит к замыканию дугового промежутка и увеличению коэффициента потерь.

Установлено, что с уменьшением длины колеблющейся части преобразователя электрических колебаний в механические резонансная частота колебаний увеличивается, а амплитуда уменьшается.

Оптимальная частота преобразователя, обеспечивающего достаточную для мелкокапельного переноса амплитуду, составляет 265 Гц.

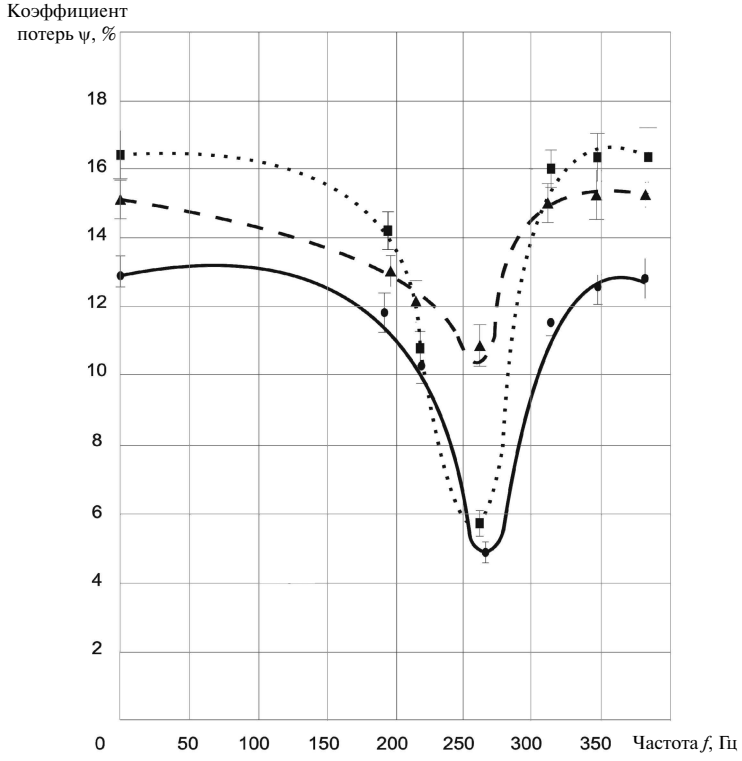


Рис. 4. Зависимость коэффициента потерь от частоты ветвей преобразователя при различных токах *I*: -▲- —40 А; —●— — 70 А; ···■··· — 110 А

Предложенный преобразователь электрических колебаний в механические позволяет за счет принудительного переноса электродного металла без коротких замыканий снизить потери на 40–50 % по сравнению со сваркой без колебаний торца электрода и снизить трудовые затраты на удаление брызг, а также уменьшить материало- и энергопотребление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Потапьевский, А.Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом [Текст] / А.Г. Потапьевский.— М.: Машиностроение, 1974.— 240 с.

2. **Ленивкин, В.А.** Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах [Текст] / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров.— М.: Машиностроение, 1989.— 264 с.

3. **Евдокимов, Н.И.** Защита поверхности металла от брызг при сварке [Текст] / Н.И. Евдокимов, П.И. Ковалкин, В.Ф. Яковлев, Н.А. Козина // Автоматическая сварка.— 1970. № 10.— С. 39–42.

4. **Лебедев, В.А.** Полуавтоматы для электродуговой сварки плавлением [Текст] / В.А. Лебедев, А.И. Гедрович.— Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2010.— С. 164–178.

5. Зарубежный опыт. Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки— процесс CMT, предложенный фирмой «Фрониус» [Текст] / Автомат. сварка.— 2004. № 12.— С. 55–58.

6. **Носовский, Б.И.** Разработка резонансного преобразователя электрических колебаний в механические для принудительного переноса электродного металла при сварке в среде углекислого газа / Б.И. Носовский, А.И. Ковалевский // Вестник ПГТУ.— 2012. № 24.— С. 206–210.

КОВАЛЕВСКИЙ Алексей Игоревич — *аспирант кафедры оборудования и технологии Приазовского государственного технического университета, ассистент кафедры металлургии и технологии сварочного производства ПГТУ.*
87515, ул. Варганова, д.4 , г. Мариуполь, Украина
моб. тел. +38-093-658-11-71
leha_mar@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК: 536:551.343.74

Б.В. Григорьев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ В РАВНОВЕСНЫХ И НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ

B.V. Grigoriev

EXPERIMENTAL STUDY OF FREEZING OF SANDY GROUND IN EQUILIBRIUM AND DISEQUILIBRIUM CONDITIONS

В статье приведено описание экспериментальной установки и результаты исследований на ней содержания незамерзшей воды в грунте при равновесном и неравновесном состоянии в системе грунт—вода—лед. Приведена аппроксимация полученных результатов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. НЕЗАМЕРЗШАЯ ВОДА. МЕРЗЛЫЙ ГРУНТ. НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ.

The paper describes the experimental system and results of the experimental studies of unfrozen water content in the soil at equilibrium and disequilibrium states in the system soil-water-ice. The approximation of the results is shown.

THE EXPERIMENTAL SYSTEM. UNFROZEN WATER. FROZEN GROUND. NON-EQUILIBRIUM PROCESSES.

Особенности, с которыми приходится сталкиваться при проектировании и реализации проектов железнодорожных и автомобильных дорог, продуктопроводов, промышленных и жилых сооружений на территориях вечной мерзлоты или подвергающихся сезонному промерзанию — оттаиванию (а это сопровождается, в первую очередь, пучинистостью при промерзании и просадкой в результате оттаивания мерзлого грунта, скачкообразным изменением прочностных и реологических свойств грунта, существенным изменением теплофизических параметров — теплоемкости, теплопроводности, связанных с кристаллизацией/таянием поровой воды), требуют от разработчика представления всей картины процессов и преобразований, происходящих в грунте при его замерзании и оттаивании.

Характерной чертой влажных грунтов является неполное замерзание поровой воды при 0 °С. Данный факт был установлен G.J. Boyoucous (1920) [1]. Согласно его исследованиям некоторое количество воды в грунте остается незамерзшим вплоть до температуры −78 °С. Внедрение калориметрического метода З.А. Нерсесовой [2] позволило получить кривые содержания незамерзшей воды в зависимости от отрицательной температуры для различных видов грунтов. При этом было установлено, что каждому типу грунта соответствует своя характерная кривая.

Необходимо добавить, что теплофизические и, особенно, прочностные и реологические свойства грунта в области отрицательных температур также не остаются постоянными, изменяясь с изменением температуры.

Несмотря на первоначально кажущуюся причину существования незамерзшей воды — соли, растворенные в поровой воде, этот факт не является решающим. Фактическое содержание незамерзшей воды для какой-либо отрицательной температуры оказывается в 5–10 раз выше, чем вычисленное по формулам для засоленного раствора [3]. Основные факторы — дисперсность грунта и, как следствие, величина активной удельной поверхности минеральных частиц $S_{уд}$. Более дисперсные грунты имеют большую поверхность минеральных частиц и, следовательно, обладают большей способностью связывать воду, содержащуюся в порах. Поэтому в глине и суглинке количество воды в незамерзшем состоянии всегда больше, чем

в песке, при одной и той же температуре. Тем не менее при анализе системы лед — вода с высокой концентрацией растворенных солей следует учитывать влияние солености на содержание незамерзшей воды.

Важная особенность процесса замерзания влажного грунта: при замораживании система лед — вода в грунте находится в состоянии термодинамического равновесия лишь при условии, что интенсивность отвода тепла ниже максимально допустимого для данного типа грунта. В случае превышения этой величины соотношение фаз в системе лед — вода нестабильно, содержание незамерзшей воды превышает значение, полученное при равновесных условиях для той же температуры [4].

Для исследования процессов замерзания — оттаивания в разных типах грунтов разработана экспериментальная установка [5], предназначенная для определения количества незамерзшей воды калориметрическим методом. Общая схема установки представлена на рис. 1.

Эксперимент проводится следующим образом. Бюкс заполняют исследуемым грунтом под некоторым усилием для устранения воздушных прослоек и пустот, после чего закрывают крышкой и вставляют термометр сопротивления по центру бюкса. Далее бюкс помещают в стакан, который находится в камере испарителя термостата. Внутреннее пространство камеры заполнено незамерзающей жидкостью (тосол), что способствует плавному охлаждению и длительному поддержанию заданной температуры. Включают термостат и выставляют требуемую отрицательную температуру. В зависимости от диаметра стакана, типа грунта и первоначальной влажности замораживание длится 1–6 часов.

Калориметр заполняют водой и калориметрической жидкостью. Важно, чтобы температура калориметрической жидкости перед началом эксперимента была выше температуры воды в оболочке на 1–2 °С. За 15–20 минут до окончания замораживания включают мешалку для выравнивания температуры воды в калориметрическом стакане в течение 5 минут.

Калориметрический опыт включает три периода, в течение которых производят отсчеты температуры по термометрам сопротивления. Первые 10–15 мин — «начальный» период опыта, когда проверяется постоянство «хода температуры калориметрической жидкости». После чего образец извлекают из термостата и помещают в калориметр. «Главный» период опыта — от момента погружения образца в калориметр до начала равномерного изменения температуры калориметрической жидкости или изменения ее хода на обратный. Длительность составляет 20–25 мин. «Конечный» период — измерение температуры в течение 10–15 минут после окончания главного периода.

На основании данных калориметрического опыта вычисляют содержание льда в образце при данной отрицательной температуре по следующей

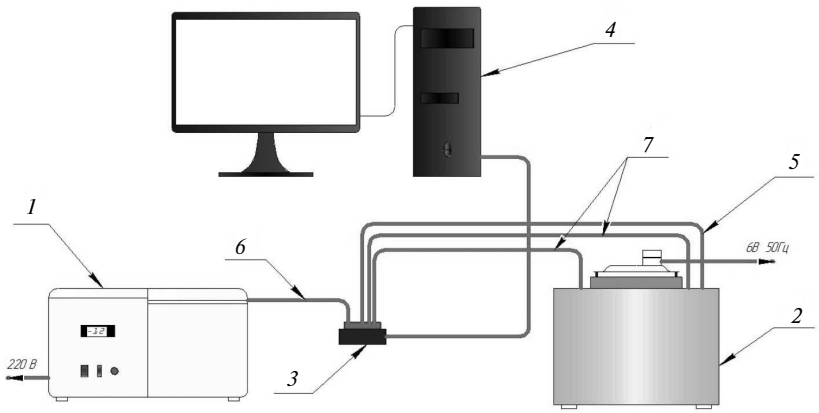


Рис. 1. Экспериментальная установка: термостат *1*; калориметр *2*; платиновые термометры сопротивления *6*, *8*, *5*; аналогово-цифровой преобразователь *3*; компьютер *4*; бюксы для грунта; три стакана различного диаметра; весы электронные

формуле, вытекающей из уравнения теплового баланса:

$$m_{\text{л}} = \frac{K\left(\vartheta_0 - \vartheta'_n\right) - |T_{\text{г}1} - T_{\text{г}2}|\left(c_{\text{г}} m_{\text{г}} + c_{\text{в}} m_{\text{в исх}} + c_{\text{б}} m_{\text{б}}\right)}{Q_{\text{ф}} - |T_{\text{г}1}|\left(c_{\text{в}} - c_{\text{л}}\right)}, \quad (1)$$

где K [кДж/К] — тепловой параметр калориметра, определяемый в ходе дополнительного эксперимента; $c_{\text{г}}$, $c_{\text{в}}$, $c_{\text{л}}$, $c_{\text{б}}$ [кДж/кгК] —теплоемкость соответственно сухого грунта, воды, льда и материала бюкса; $m_{\text{г}}$, $m_{\text{в исх}}$, $m_{\text{л}}$, $m_{\text{б}}$, кг, — массы грунта, воды (исходная), льда и бюкса; $Q_{\text{ф}}$[кДж/кг] — теплота фазового перехода; $|T_{\text{г}1} - T_{\text{г}2}|$; $\left(\vartheta_0 - \vartheta'_n\right)$ — изменение температуры образца и калориметрической жидкости в ходе эксперимента; ϑ'_n — температура последнего отсчета главного периода с учетом поправки на теплообмен, найденной по формуле Реньо — Пфаундлера — Усова [6].

Вес $m_{\text{н}}$ незамерзшей воды при заданной отрицательной температуре находят по разности

$$m_{\text{н}} = m_{\text{в исх}} - m_{\text{л}}. \quad (2)$$

В серии экспериментов в качестве исследуемого грунта был использован мелкодисперсный влажный песок массой 109,116 г, масса воды в грунте составила 20,504 г, масса сухого образца — 88,612 г.

В ходе проводимых экспериментов грунт замораживался до различных температур в интервале –(0,5–11)°С; каждый раз замораживание длилось 1 час, после чего проводили калориметрический опыт. В результате получен ряд значений массы незамерзшей воды, соответствующий величинам отрицательной температуры (рис. 2).

Было установлено, что большая часть воды (70 % от начальной массы) замерзла в узком интервале температур, от 0 до –0,5 °С. Это объясняется, в первую очередь, малой по сравнению, например, с глиной величиной удельной активной поверхности минеральных частиц, благодаря чему большая часть поровой воды — свободная и застывает вблизи нуля (рис. 2).

Та часть воды, что оказалась связанной частицами грунта, замерзает в интервале от –0,5 до –3 °С, после чего, видимо, остается лишь прочносвязанная и высокоминерализованная вода, образовавшаяся в результате отжатия солей при замерзании свободной и связанной воды.

Дополнительно, чтобы исключить вероятность влияния солености на содержание незамерзшей воды, на жидкостном ионном хроматографе было определено содержание основных ионов водорастворимых солей в песке. Получены следующие результаты, г/л:

Хлорид (Cl)	0,114
Сульфат (SO_4)	0,025
Гидрокарбонат (HCO_3)	0,318
Натрий (Na)	0,095
Калий (K)	0,044
Магний (Mg)	0,018
Кальций (Ca)	0,074
Суммарная минерализация	0,687

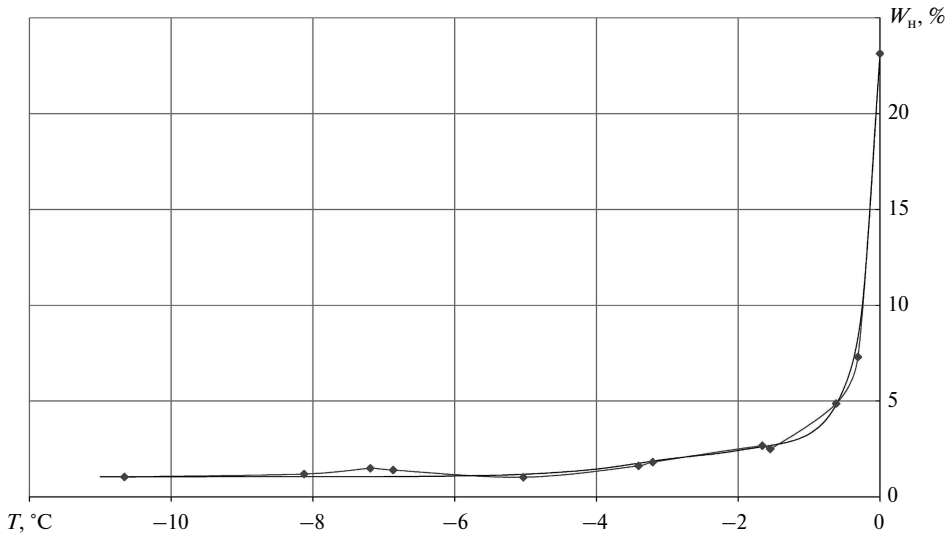


Рис. 2. Экспериментальная (–•–) и аппроксимационная (—) кривые зависимости содержания незамерзшей воды от температуры

Данные говорят о низкой минерализации поровой воды. Очевидно, что такая концентрация солей не способна заметно повлиять на характер кривой рис. 2.

Чтобы установить степень влияния интенсивности замораживания на содержание незамерзшей воды для данного типа грунта, были проведены пять серий экспериментов по замораживанию с различной интенсивностью теплоотвода. В результате получены 5 кривых содержания незамерзшей воды, для случаев когда замораживание длилось 3 часа, 1 час, 35 минут, 25 мин и 16 минут (рис. 3).

Видно, что экспериментальные точки трех кривых (3 часа; 1 час; 35 минут) практически совпадают, т. е. любая из этих трех кривых является равновесной (система лед — незамерзшая вода находится в устойчивом термодинамическом равновесии). В то же время, как следует из рис. 3, при замораживании в течение 16 и 25 минут наблюдается ярко выраженное отклонение системы от равновесного состояния. При этом чем ниже конечная температура замораживания, тем меньше отклонение от равновесия. Очевидно, что, продолжая проводить эксперимент для кривой «16 мин», например при $T = -11$ °С, полученное значение $W_н$ не отличалось бы от равновесного ее содержания при этой температуре. Такой характер кривой, по мнению автора, объясним следующим образом: при быстром отводе тепла от системы грунт—вода часть свободной воды не кристаллизуется, превращаясь в аморфную структуру. При высоких отрицательных температурах силы взаимодействия между молекулами воды не успевают сгруппировать их в тетраэдры (что обусловлено в первую очередь высокой интенсивностью теплоотвода в короткий промежуток времени и высокой температурой T), однако при более низких температурах, как указано в статье [7], силы взаимодействия значительно возрастают, и, следовательно, больше молекул воды группируется в тетраэдры с высвобождением скрытой теплоты кристаллизации, т. е. межмолекулярные силы в воде при низкой отрицательной температуре преобладают над дезориентационным эффектом при такой интенсивности замораживания.

Аппроксимация по разработанной автором методике равновесной кривой, в качестве которой выбрана кривая «1 час» (хотя можно взять любую из трех), выражена следующей зависимостью (рис. 2):

$$W(T) = e^{\frac{t}{10}f(t)}\left(W_{исх} - W_{ост}\right) + W_{ост}, \qquad (3)$$

где $W_{ост}$ — влажность грунта при $t = -10{,}65$ °С; $W(t)$ — искомое значение влажности при температуре t,°С;

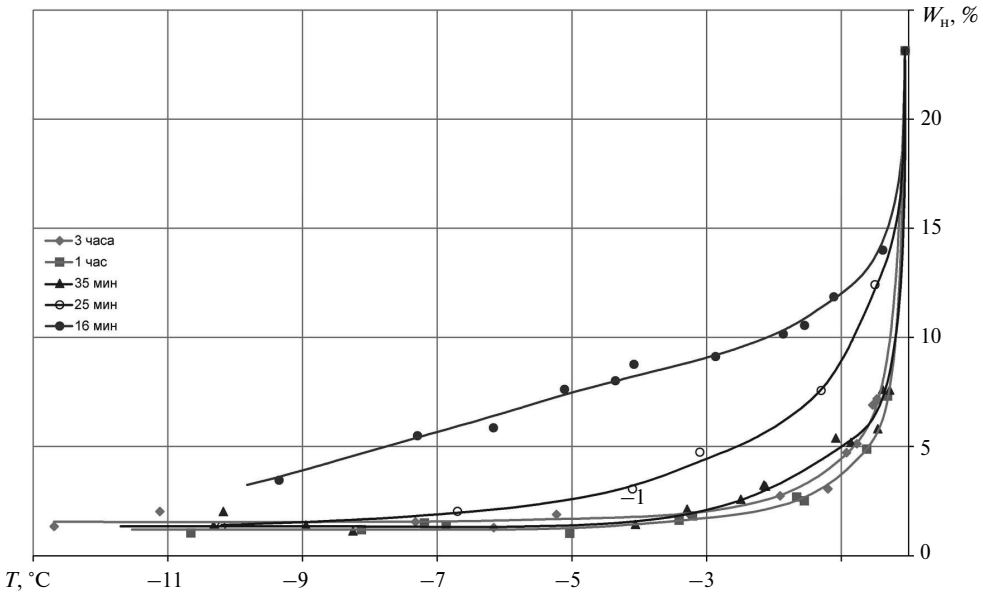


Рис. 3. Экспериментальные зависимости содержания незамерзшей воды в грунте для разных длительностей замораживания:
— 3 часа; — 1 час; — 35 мин; — 25 мин; — 16 мин

$$f(t) = 0{,}10t^3 + 2{,}14t^2 + 14{,}57t + 38{,}65. \quad (4)$$

Различие между экспериментальными данными (см. рис. 2) и значениями влажности, полученными по формуле [6], не превышает 2 %.

Для семейства неравновесный кривых на рис. 3 эмпирическая зависимость влажности мерзлого грунта аппроксимируется следующей формулой:

$$W(t,\tau) = W_{\text{ост}} + (1 - W_{\text{ост}})\overline{W}(t)^{n(\overline{\tau})}, \quad (5)$$

где $\overline{W}(t) = \dfrac{W_0(t) - W_{\text{ост}}}{1 - W_{\text{ост}}}$; $W_0(t)$ — зависимость влажности мерзлого грунта от температуры в равновесных условиях; $n(\overline{\tau}) = 0{,}88\overline{\tau} + 0{,}12$;

$$\overline{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0} \quad (6)$$

τ, τ_0 — время изменения температуры грунта на Δt, °С, в неравновесных и равновесных условиях.

Максимальная погрешность определения относительной влажности грунта по зависимости (5) в рассмотренных условиях не превышает 6 %.

Создана экспериментальная установка, позволяющая изучать калориметрическим методом процессы промерзания — оттаивания влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях.

Экспериментально доказано, что большая часть поровой воды в песке — 70 %, замерзает в узком температурном интервале — от 0 до –0,5°С.

Получены экспериментальные данные о неравновесном процессе промерзания песка при различной интенсивности параметров теплопереноса. Влияние интенсивности отвода тепла на содержание незамерзшей воды наиболее выражено в области высоких отрицательных температур и убывает с уменьшением последних.

В рамках проведенных исследований установлено, что минимальное время, достаточное для равновесного замораживания песчаного грунта составляет 35 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **P. Newman, Greg.** Heat and mass transfer in unsaturated soil during freezing [Текст]: A Thesis Submitted to the faculty of graduate studies and research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the department of Civil Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Canada / Greg P. Newman.— 1995.— 246 pages.

2. **Цытович, Н.А.** Механика мерзлых грунтов [Текст] / Н.А. Цытович.— М.: Высшая школа, 1973.— 448 с.

3. **Горелик, Я.Б.** Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере [Текст] / Я.Б. Горелик, В.С. Колунин.— Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002.— 317 с.

4. **Даниэлян, Ю.С.** Исследования неравновесного тепломассопереноса в грунтах с фазовыми переходами влаги применительно к проектированию обустройства нефтяных месторождений [Текст]: Дисс. ... д. ф-м. наук / Ю.С. Даниэлян.— 01.04.14 Тюмень, 1997.— 368 с.

5. **Григорьев, Б.В.** Экспериментальное исследование промерзания-оттаивания грунтов в неравновесных условиях [Текст] / Б.В. Григорьев, А.Б. Шабаров // Вестник Тюменского государственного университета.— Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2012.— С. 53–60.

6. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов [Текст] / Произв. и науч.-исслед. ин-т по инж. изысканиям в стр-ве Госстроя ССР. Науч.-исслед. ин-т оснований и подземных сооружений Госстроя СССР. — М. : Стройиздат, 1973. — 191 с.

7. **Ананян, А.А.** Природа воды в тонкодисперсных горных породах и особенности ее кристаллизации [Текст] / А.А. Ананян // 2-я Междунар. конф. по мерзлотоведению (Якутск). Доклады и сообщения. Вып. 4: Физика, физико-химия и механика мерзлых горных пород и льда / Акад. наук СССР. — Якутск: Якутское книжное изд-во, 1973. — С. 111–116.

8. **Вакулин, А.А.** Основы геокриологии [Текст] / А.А. Вакулин.— Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2011.— 220 с.

ГРИГОРЬЕВ Борис Владимирович — *научный сотрудник Тюменского государственного университета.*
625003, ул. Семакова, 10, г. Тюмень, Россия
(3452) 46-40-61
Raskatov_@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 539.3

А.А. Лукашевич

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНТАКТНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

A.A. Lukashevich

COMPUTATIONAL MODELS OF CONTACT INTERACTION AND DESTRUCTION OF DEFORMABLE BODIES USING THE CONTACT FINITE ELEMENTS

Предложен численный подход к решению задач контактного взаимодействия и разрушения упруго-деформируемых тел. Взаимодействие берегов трещин, включая силы трения и контактное давление, моделируется посредством контактных конечных элементов рамного типа с использованием метода пошагового анализа.

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ. ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ. ТРЕЩИНА. ОДНОСТОРОННИЕ СВЯЗИ. ТРЕНИЕ КУЛОНА. ПОШАГОВЫЙ АНАЛИЗ. КОНТАКТНЫЙ ЭЛЕМЕНТ.

The numerical approach to contact interaction and destruction of elastic-deformable solids is offered. The interaction of crack edges, including friction and contact pressure, is modeled by frame contact finite elements using the step-by-step analysis.

CONTACT INTERACTION. FRAGILE DESTRUCTION. CRACK. UNILATERAL CONSTRAINTS. CULON'S FRICTION. STEP-BY-STEP ANALYSIS. CONTACT ELEMENT.

Известно, что под действием нагрузки на деформируемое тело, особенно, если материал хрупкий, при достижении определенного уровня напряженно-деформированного состояния может начаться процесс разрушения, поначалу имеющий локальный характер (зарождение трещин в зонах контакта или максимального растяжения, концентраторах и т. п.), а затем катастрофически развивающийся вглубь области. Применение численных методов к решению такого рода задач позволяет не только моделировать развитие повреждений (раскрытие и рост трещин, фрагментация сплошной области и т. п.), но и прогнозировать и оценивать разрушения. В этой связи для реализации контактных условий в трещинах предлагается использовать опубликованные в работах [1, 2] конечно-элементные модели контакта и соответствующие методы их расчета.

Решение задачи деформирования и разрушения сооружений осуществляется с помощью известных моделей механики деформируемого твердого тела. Материал рассматривается как линейно упругий. Для определения момента разрушения анизотропного материала используется критерий прочности, предложенный Э.М. Ву [3]. Данный критерий, имеющий удобную для численной реализации формулировку (выражение через функции от компонент тензора напряжений), может быть записан в виде

$$f(\sigma_{ij}) = D_{ij}\,\sigma_{ij} + D_{ijkl}\,\sigma_{ij}\,\sigma_{kl} + \ldots \geq 1,$$

где $$i, j, k, l = 1, 2, 3. \qquad (1)$$

Здесь D_{ij} и D_{ijkl} — компоненты соответствующих тензоров, определяемые через пределы прочности на растяжение, сжатие и сдвиг.

Разрешающее уравнение (матричное уравнение равновесия) здесь представляется в виде, позволяющем свести решение конструктивно нелинейной задачи квазистатического деформирования и разрушения к решению последовательности линейных задач методом пошагового анализа [1]:

$$\mathbf{K}\,\Delta\mathbf{U}^{s+1} = \mathbf{P}^{s+1} - \mathbf{K}\,\mathbf{U}^{s}, \qquad (2)$$

где перемещения на $(s+1)$-м шаге $\mathbf{U}^{s+1} = \mathbf{U}^{s} + \Delta\mathbf{U}^{s+1}$. В случае динамического действия нагрузки решение конструктивно нелинейной динамической задачи сводится к решению последовательности линейных динамических задач на основе пошагового по времени расчета [2]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t} + \mathbf{K}\Delta\mathbf{U}^{t+\Delta t} = \mathbf{P}^{t+\Delta t} - \mathbf{K}\mathbf{U}^{t}, \quad (3)$$

где $\mathbf{U}^{t+\Delta t} = \mathbf{U}^{t} + \Delta\mathbf{U}^{t+\Delta t}$. Для численного интегрирования уравнений (3) используется конечно-разностная схема Ньюмарка. При учете односторонних связей и кулоновского трения между граничными поверхностями в трещинах должны выполняться следующие условия контакта:

$$\left.\begin{array}{l} u_n^t \le 0,\ \sigma_n^t \le 0,\ u_n^t \sigma_n^t = 0; \\ \left|\sigma_\tau^t\right| \le -f\sigma_n^t,\ \sigma_\tau^t\ \dot{u}_\tau^t \le 0,\ \left(\left|\sigma_\tau^t\right| + f\sigma_n^t\right)\dot{u}_\tau^t = 0 \end{array}\right\} \mathbf{x} \in S_c. \quad (4)$$

Здесь u_n^t, u_τ^t — взаимные перемещения контактирующих поверхностей S_c^+ и S_c^- ($S_c = S^+{}_c \cup S^-$) соответственно по нормали и по касательной в момент времени t; $\dot{u}_\tau^t = \partial u_\tau^t / \partial t$ — скорость взаимных касательных перемещений; f — коэффициент трения; σ_n^t, σ_τ^t — нормальное и касательное напряжения на площадке контакта в момент времени t.

Численное решение контактной задачи будет заключаться в проведении процесса пошагового нагружения для уравнений (2) либо пошагового интегрирования по времени уравнений (3) при соответствующих начальных и граничных условиях, а также выполнении условий (4) на возможных контактах в трещинах. При проведении МКЭ моделирования процесса разрушения на каждом шаге (по нагрузке либо по времени) необходимо, кроме того, решать следующие вопросы:

определение места возникновения разрушения (действия на уровне данного узла конечно-элементной сетки — образование микротрещины);

собственно численное описание характера разрушения (локальные действия на уровне конечно-элементной сетки — образование макротрещины).

Моделирование механизма разрушения на уровне конечно-элементной сетки заключается, во-первых, в установлении картины разрушения (ориентация и размеры трещин, формы и размеры осколков, размеры области дробления или фрагментации); во-вторых, в математическом описании изменения и накопления повреждений (рост трещин, их слияние, образование магистральных макротрещин и их распространение); наконец, в учете влияния разрушения на остальные характеристики материала, в первую очередь на его прочностные свойства. В то же время при численном описании процесса разрушения (картина которого заранее не известна), а также контактного взаимодействия в трещинах целесообразно вводить поверхность разрушения (макротрещина) и при необходимости локально перестраивать сетку. С учетом вышеизложенного для моделирования процесса разрушения хрупких материалов используется комбинация подходов: метод раздвоения узлов (при возникновении микротрещины) и метод локальной перестройки сетки (при вводе поверхности разрушения и описании поведения макротрещины).

Моделирование трещины осуществляется путем разделения узла (в окрестности которого сработал критерий разрушения) на два, расположенных на разных берегах микротрещины. Таким образом, дальнейшее распространение трещины происходит по узлам и смежным сторонам конечных элементов сетки. Посредством расщепления конечно-элементной сетки вдоль сторон элементов, лежащих по одну и по другую стороны от направляющего луча трещины, образуется поверхность разрушения — макротрещина. Вводится Г-образный рамный контактный конечный элемент (ККЭ) типа «поверхность — узел» [4], соединяющий узлы противолежащих ячеек сетки и моделирующий контактное взаимодействие берегов макротрещины (рис. 1, *а*, *б*).

Граничные условия (4) в терминах усилий и перемещений для каждого рамного ККЭ в этом случае примут следующий вид [2]:

$$\left.\begin{array}{l} u_{nk}^t \le 0,\quad N_k^t \le 0,\ u_{nk}^t N_k^t = 0 \\ \left|Q_k^t\right| \le \left|Q_{pk}^t\right|,\ Q_k^t\,\dot{u}_{\tau k}^t \ge 0,\ (Q_k^t - Q_{pk}^t)\,\dot{u}_{\tau k}^t = 0 \end{array}\right\} k \in S_c. \quad (5)$$

Здесь u_{nk}^t, $\dot{u}_{\tau k}^t$ — взаимное нормальное перемещение и скорость взаимного касательного перемещения противолежащих узлов k-го ККЭ в момент времени t; N_k^t, Q_k^t — продоль-

ная и поперечная силы в рамном ККЭ ; $Q^t_{pk} = \text{sign}(\dot{u}^t_{\tau k})\, f_k \left| N^t_k \right|$ — значение предельной поперечной силы для момента *t*. Состояние сцепления контактных поверхностей в трещине определяется следующими условиями: $u^t_{nk} = \delta^0_{nk}$, $N_k < 0$, $\dot{u}^t_{\tau k} = 0$, $\left| Q^t_k \right| < \left| Q^t_{pk} \right|$; состояние проскальзывания: $u^t_{nk} = \delta^0_{nk}$, $N^t_k < 0$, $\dot{u}^t_{\tau k} \neq 0$, $\left| Q^t_k \right| = \left| Q^t_{pk} \right|$; состояние отрыва: $(u^t_{nk} - \delta^0_{nk}) < 0$, $N^t_k = 0$. Численная реализация контактных условий в трещинах, включая силы трения и контактное давление, производится согласно методикам, изложенным в работах [1, 2].

Ориентация образовавшейся макротрещины и направление ее дальнейшего роста определяется по лучу, наиболее близкому к расчетной плоскости, совпадающей с площадкой максимальных растягивающих напряжений (если трещина — за счет отрыва), либо с площадкой, на которой действует максимальное касательное напряжение (если трещина — за счет сдвига). Далее производится корректировка положения макротрещины в конечно-элементной сетке путем сдвига узлов сетки на данный луч либо локальной перестройки конечно-элементной сетки в направлении трещины.

После каждого локального перестроения сетки требуется пересчитать соответствующие узловые и элементные параметры, характеризующие состояние обновленной дискретной схемы (геометрия, смещения, контактный слой, НДС). Пересчет выполняется по значениям аналогичных параметров в исходных узлах и элементах с использованием обычных интерполяционных схем, а также с учетом весовых характеристик рассматриваемых конечных элементов. При моделировании задачи хрупкого разрушения материала в двумерной постановке представляется, что критерий разрушения срабатывает одновременно по всей глубине материала. Таким образом, появившаяся трещина (как и другие формы разрушения) предполагается сквозной также по всей глубине. В процессе роста микротрещин, их слияния и дробления материала (фрагментация) возможно образование раскалывающей магистральной макротрещины, часто в виде полосы разрушения толщиной в несколько слоев конечных элементов, и ее распространение в сплошной среде.

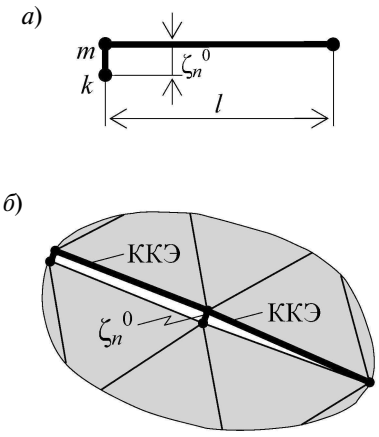


Рис. 1. Рамный ККЭ (*а*) и схема взаимодействия берегов трещины (*б*)

Порядок расчета при пошаговом (по нагрузке либо по времени) моделировании процесса деформирования и разрушения упруго-деформируемых тел будет следующим:

на каждом шаге проверяется критерий разрушения в узлах рассматриваемой области;

при срабатывании критерия разрушения в каком-либо узле определяется плоскость образовавшейся микротрещины, совпадающая с площадкой максимальных растягивающих напряжений, либо с площадкой сдвига;

данный узел разделяется на два — распространение трещины происходит по узлам и сторонам сетки, образуется макротрещина;

корректируются главные напряжения и для раздвоенных узлов пересчитываются значения компонент напряжений в основной системе координат;

вводится контактный элемент, соединяющий пару раздвоенных узлов и моделирующий контактное взаимодействие берегов макротрещины как в нормальном, так и касательном направлении;

с целью корректировки текущего положения и моделирования распространения макротрещины выполняется локальная перестройка сетки в ее окрестности, а именно: устанавливается положение вершин трещины в конечных элементах, через которые она проходит, и эти элементы делятся на пары элементов, лежащих по разным берегам трещины;

пересчитываются соответствующие узловые и элементные параметры, характеризующие со-

стояние обновленной дискретной схемы, а также оптимизируется нумерация узлов обновленной конечно-элементной сетки.

Приведенные дискретные контактные модели и методы их расчета использовались для численного анализа повреждения кости при проникающем действии жесткого индентора (данная задача моделирует рубленую травму трубчатой кости острым предметом). Жесткостные и прочностные характеристики костной ткани, а также результаты натурных испытаний взяты из [5]. Индентор — легированная сталь типа 20Х (модуль упругости $E = 207$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}25$). Костная ткань моделируется упруго-хрупкой ортотропной средой с использованием критерия разрушения Ву. Характеристики в продольном направлении: $E = 9{,}45$ ГПа, $\sigma_F = 100$ МПа, $\sigma_{F\,сж} = 250$ МПа; в поперечном: $E = 5{,}76$ ГПа, $\sigma_F = 17$ МПа, $\sigma_{F\,сж} = 50$ МПа; $\nu = 0{,}328$. Упругие и прочностные характеристики (E, σ_F) заполнителя трубчатой кости принимались на порядок меньше, чем для основного материала. Коэффициент трения между контактирующими поверхностями индентора и материала кости — $f_{и-к} = 0{,}1$; между поверхностями трещины — $f_{к-к} = 0{,}3$. Закрепление трубчатой кости выполнялось с помощью упругих связей, наложенных в узлах по ее верхней и нижней поверхности (упругие опоры моделируют двухсторонний контакт кости с упругоподатливой подложкой со стороны окружающих кость мышечных тканей). Построение дискретной модели системы «индентор — кость» соответствовало реальным геометрическим размерам. Для моделирования контакта между граничными поверхностями индентора и кости использовались Т-образные рамные ККЭ типа «поверхность — узел», между поверхностями (берегами) трещин — Г-образные ККЭ [4].

Таким образом, в представленных здесь примерах моделировалось как контактное взаимодействие при проникающем действии индентора в кость, так и взаимодействие берегов трещин в процессе трещинообразования, распространения макротрещин и фрагментации кости. Расчеты выполнялись методом пошагового (по времени либо по нагрузке) анализа состояния контакта [1, 2] с уточнением НДС и перестройкой конечно-элементной сетки при появлении и росте трещин. В процессе расчета внедрения индентора производится автоматическое переопределение контактных элементов, дискретизирующих буферную зону между граничными поверхностями индентора и кости. Определение текущей зоны контакта в этом случае осуществляется с помощью алгоритма типа «господин — слуга».

На рис. 2 представлены результаты натурных испытаний и численного анализа разрушения кости рубящим острым (угол лезвия 30°) предметом при поперечном ударе. В виде изополей показано распределение первых главных напряжений. Задача решалась в динамической двумерной (плоская деформация) постановке. Динамическое нагружение моделировалось заданием импульса узловых сил, приложенных к индентору в направлении удара. Показано соответствие экспериментальных и расчетных результатов: прогнозируемых и оригинальных зон разруба, формирования сколов, зарождения и развития опережающих трещин, перелома.

На рис. 3 показано оригинальное рубленое повреждение трубчатой кости топором (угол

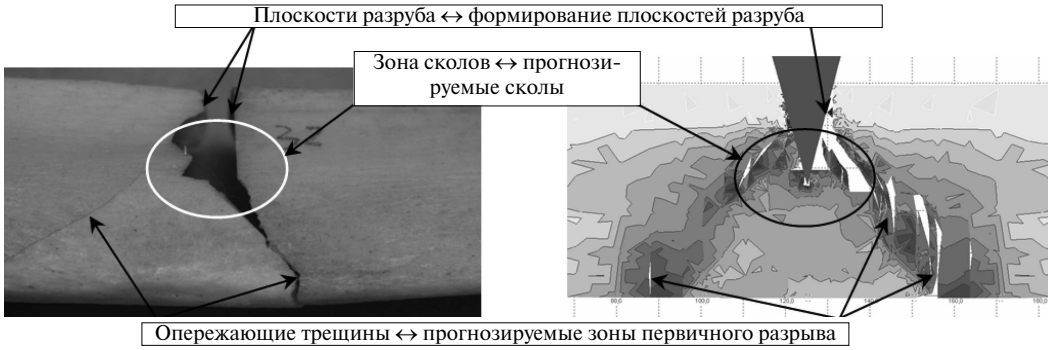


Рис. 2. Контактное разрушение трубчатой кости при поперечном ударе

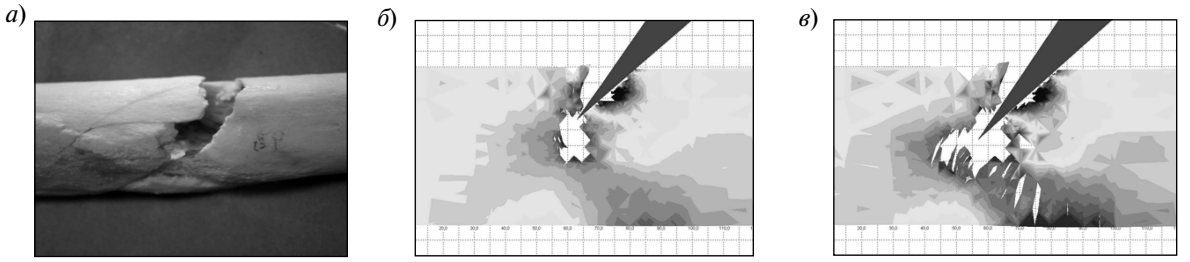


Рис. 3. Оригинальное (*а*) рубленое повреждение трубчатой кости топором и результаты численного расчета (при 70 (*б*) и 100 (*в*) % нагружения)

лезвия 15°) под углом 45°, а также результаты численных расчетов, иллюстрирующих характер разрушения кости при внедрении острого индентора на разных стадиях пошагового расчета (отображается только сплошная область, без зон фрагментации, а также изополя главных напряжений). Данная задача решалась в квазистатической двумерной постановке. Для моделирования статического нагружения к индентору по шагам прикладывалась нагрузка в направлении воздействия.

Проведенные численные исследования показали хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов, несмотря на существенную приближенность используемых расчетных схем (приведение к двумерной задаче для ортотропного материала) реальному объекту (трубчатая кость, имеющая сложные физико-механические свойства). Как видно по рис. 2 и 3, конфигурация и форма трещин, соответствие прогнозируемых и оригинальных зон разруба, формирования сколов, зарождения и развития перелома (магистральных и встречных трещин), полученных при проведении натурных испытаний, в общем совпадают с полученными численными решениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лукашевич, А.А.** Решение контактных упругих задач с трением Кулона при пошаговом нагружении [Текст] / А.А. Лукашевич // Изв. вузов. Строительство.— 2008. № 10.— С. 14–21.

2. **Розин, Л.А.** Решение задач с односторонними связями при динамических воздействиях [Текст] / Л.А. Розин, А.А. Лукашевич // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2009. № 3 (84).— С. 195–199.

3. **Ву, Э.М.** Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред [Текст] / Э.М. Ву // Механика композиционных материалов.— М.: Мир, 1978.— С. 401–491.

4. **Лукашевич, А.А.** Построение и реализация схем прямого метода конечных элементов для решения контактных задач [Текст] / А.А. Лукашевич // Изв. вузов. Строительство.— 2007. № 12.— С. 18–23.

5. **Леонов, С.В.** Рубленые повреждения кожного покрова и костей [Текст] / С.В. Леонов.— Хабаровск: Изд-во ИПКЗС, 2006.— 263 с.

ЛУКАШЕВИЧ Анатолий Анатольевич — *доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов инженерно-строительного института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-63-03
a.luk@bk.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 535.317.2

М.Е. Зацепина, В.К. Кирилловский

СОВРЕМЕННЫЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ТЕНЕВОЙ МЕТОД С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

M.E. Zatsepina, V.K. Kirillovskii

THE MODERN QUANTITATIVE SHADOW METHOD BASED ON THE APPLICATION OF THE COMPUTER TECHNOLOGY

Данная статья посвящена разработке современного количественного метода ножа Фуко, который обеспечивает контроль с широкими возможностями. Компьютерная обработка полученных данных осуществляется при помощи программы, которая позволяет восстанавливать волновой фронт, измерять волновые аберрации исследуемой оптической системы и определять требуемые характеристики качества даваемого изображения. Использование метода изофотометрии тенеграммы ножа Фуко повышает точность количественного теневого метода

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ. ТЕНЕВОЙ МЕТОД НОЖА ФУКО. ДЕФОРМАЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ. МЕТОД ИЗОФОТОМЕТРИИ.

This article is dedicated to the development of a modern quantitative method of Fufo knife-edge, providing the control with wide opportunities. Computer processing of the data is carried out with a program that allows to restore the wave front, to measure the wave aberrations of the optical system and to determine the required characteristics given by the quality of the image. The using of a method of an izofotometry improves the accuracy of quantitative shadow method

OPTICAL INSPECTION METHODS. THE SHADOW METHOD OF FUKO KNIFE-EDGE. THE DEFORMATION OF THE WAVEFRONT. THE SENSITIVITY. THE METHOD OF IZOFOTOMETRY.

Существует ряд разнообразных методов исследования формы оптической поверхности. Выделяют следующие требования, которые предъявляются к методам контроля: точность (соизмеримая с длиной волны); получение полной информации об оптической поверхности — количественной карты ошибок всей оптической поверхности; возможность объективной оценки; возможность получения документа, позволяющего анализировать исследуемую систему на соответствие техническим требованиям и допускам.

В рамках этих требований может быть рассмотрена схема классификации методов контроля оптических поверхностей (рис. 1).

Методы контроля ошибок обработки оптической поверхности можно разделить по принципу работы измерительного прибора на геометрические и волновые. К геометрическим методам относятся метод Гартмана и теневой метод Фуко [3]. К волновым — интерферометрический метод контроля [5].

Теневые методы можно подразделить на несколько типов [1, 2]: метод нити, метод щели, метод щели и нити, а также метод, использующий многощелевой анализатор, т. е. линейную решетку (метод Ронки). До появления компьютеров перечисленные разновидности теневых методов редко применялись для количественных исследований ошибок и аберраций при изготовлении оптических систем и поверхностей, так как позволяли получать только отдельные параметры изделий (радиус кривизны, фокусное расстояние, отдельные значения геометрических аберраций). Благодаря нашим недавним разработкам [4] стало возможно получение карты оптической поверхности методом Ронки.

Традиционный теневой метод Фуко

Впервые в 1858 году Фуко предложил метод контроля ошибок формы оптической поверхности [1]. Метод по своей сути прост: изображение точечного источника света, освещающего

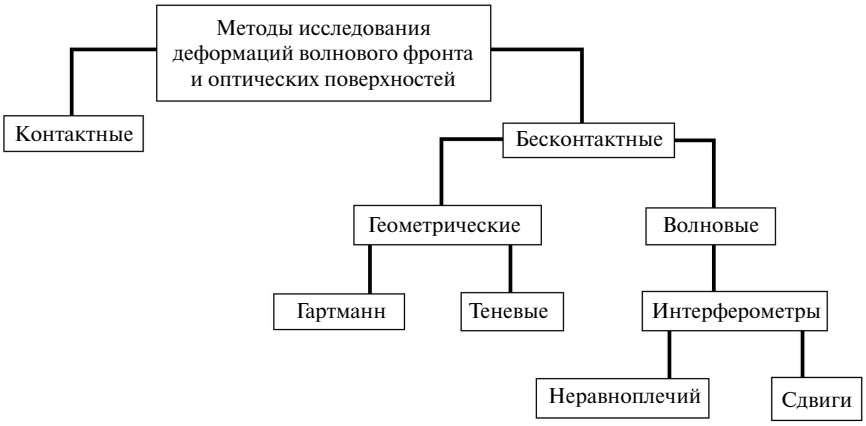


Рис. 1. Классификация методов исследования оптических поверхностей

исследуемое зеркало, наполовину перекрывается ножом с прямолинейным лезвием (рис. 2, *а*), глаз помещается за изображением источника, и наблюдатель видит на исследуемой поверхности или в зрачке исследуемой оптической системы теневую картину как систему пятен, которые соответствуют распределению ошибок поверхности или аберрациям оптической системы.

На приведенном примере принципиальной схемы теневого метода Фуко (рис. 2, *б*) изображена схема хода лучей, которые дает изображающая оптическая система.

Центральная зона поверхности, в отличие от периферийной зоны (имеющей симметричную ошибку), ошибок не имеет.

Лучи от верхней (относительно края ножа) половины зоны с ошибкой пересекают оптическую ось в точке *2*, находящейся ближе к исследуемой поверхности, чем нож Фуко. Отображение данной зоны на теневой картине оказывается неосвещенным (0 %), поскольку лучи задерживаются ножом Фуко. Лучи от нижней половины данной зоны также пересекают оптическую ось в точке *2*, но проходят мимо ножа, поэтому данная зона освещена на 100 %. Пучки лучей от центральной зоны, не имеющей ошибок, заслоняются ножом Фуко наполовину. Поэтому в центральной зоне на теневой картине освещенность составляет только 50 %.

Метод ножа Фуко дает возможность наглядно, просто и с высокой чувствительностью контролировать наличие и характер деформаций волнового фронта. Метод пригоден для обнаружения поперечных аберраций оптической системы.

Недостаток классического метода ножа Фуко заключается в том, что метод в основном — качественный. Оптик наблюдает теневую картину, обнаруживает ошибки волнового фронта контролируемой системы при обработке оптических поверхностей и контроле аберраций. Возможности выполнения количественных исследований весьма ограничены.

Количественный теневой метод Фуко — Филбера

Наиболее близка к предлагаемому авторами методу модификация теневого метода, предложенная Филбером [3], где с помощью фотоэлектрического анализа одной тенеграммы осуществляется отображение первой производной деформаций волнового фронта в виде электрических сигналов и отображение на телеэкране наглядной формы профиля деформаций волнового фронта (после аналогового интегрирования) в виде графиков по строкам телевизионного сканирования.

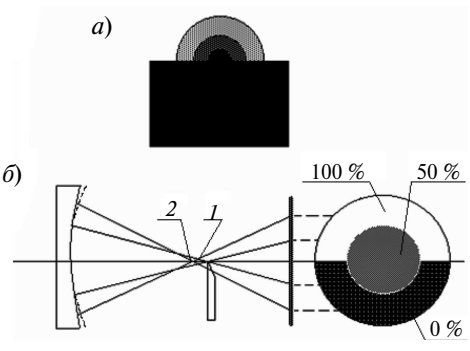


Рис. 2. Формирование теневой картины

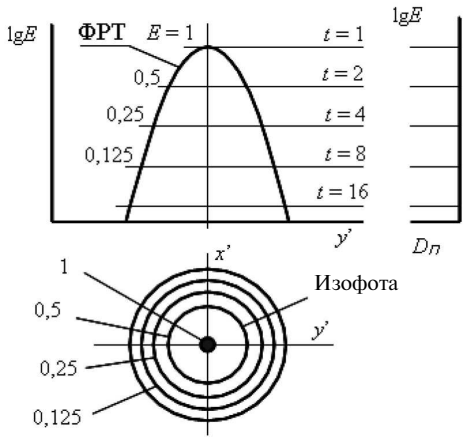
Однако данный метод имеет ограниченную область применения. Его главные недостатки — необходимость изготовления довольно сложной специальной телевизионной аппаратуры для реализации метода и чувствительность к фотометрическим неоднородностям.

Метод позволяет исследовать характер преобладающих на данной поверхности аберраций и ошибок, но не позволяет получить полную двумерную карту деформаций волнового фронта.

Модернизация метода количественной расшифровки теневой картины ножа Фуко

Нами проводится исследование, направленное на разработку нового количественного теневого метода, который позволил бы осуществлять оптические измерения ошибок (нормальных отклонений) исследуемой поверхности и получать топограмму волнового фронта, сформированного оптическими поверхностями и системами, чтобы контролировать их ошибки и аберрациям, а также использовать для расчета характеристик качества оптического изображения, таких, как функция рассеяния точки (ФРТ), функция рассеяния линии (ФРЛ), частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) и функция концентрации энергии.

Сущность метода заключается в следующем. На установке Фуко получают две теневые картины исследуемой системы [6]. Первая теневая картина наблюдается при расположении ножа вертикально, вторая — при расположении ножа горизонтально.



Изофотограмма

Рис. 3. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления (t) и вид изофотограммы

Теневой прибор Фуко оборудован матричной фотокамерой, передающей оптическое изображение теневой картины в компьютер, оснащенный программой изофотометрии (рис. 3).

Как известно, изофота есть геометрическое место точек равной освещенности в данном изображении. Изображение может быть представлено двумерным массивом точек в системе пространственных координат. Двумерная функция распределения освещенности (интенсивности) определяет содержание изображения.

Такая плавная двумерная функция отображает содержание полутоновой тенеграммы. Для получения изофотограммы необходимо для каждого выбранного уровня относительной освещенности ($E = 1$; $E = 0{,}5$; $E = 0{,}25$ и др.) выделить точки двумерного массива, которые сформируют изофоты поверхности, создаваемой двумерной функцией распределения освещенности (интенсивности) в полутоновой теневой картине, и совместить эти контуры в единой системе координат (x', y''), чтобы получить карту изофот теневой картины — изофотограмму (рис. 4, б).

Так, тенеграмма, сформированная из полутоновых деталей, наглядно демонстрирующих неровности профиля функции первой производной от поверхности ошибок волнового фронта (т. е. функции поперечных аберраций) или от ошибок обрабатываемой оптической поверхности, преобразуется в карту функции распределения относительной освещенности в тенеграмме.

Итак, две теневые картины Фуко, полученные с поворотом ножа на 90°, после выделения изофот трансформируются в две картины системы полос, соответствующие двум теневым картинам Ронки [1], которые далее обрабатываются программой совместно как две интерферограммы взаимно-перпендикулярного сдвига исследуемого волнового фронта [6].

Необходимая обработка выполняется с применением программы «Tiger» (разработка кафедры прикладной и компьютерной оптики НИУ ИТМО). Программа позволяет, обрабатывая попарно интерферограммы сдвига (в том числе полученные нами теневые картины Ронки), восстанавливать волновой фронт исследуемой поверхности и анализировать результаты с получением карты деформаций исследуемого

а) *б*)

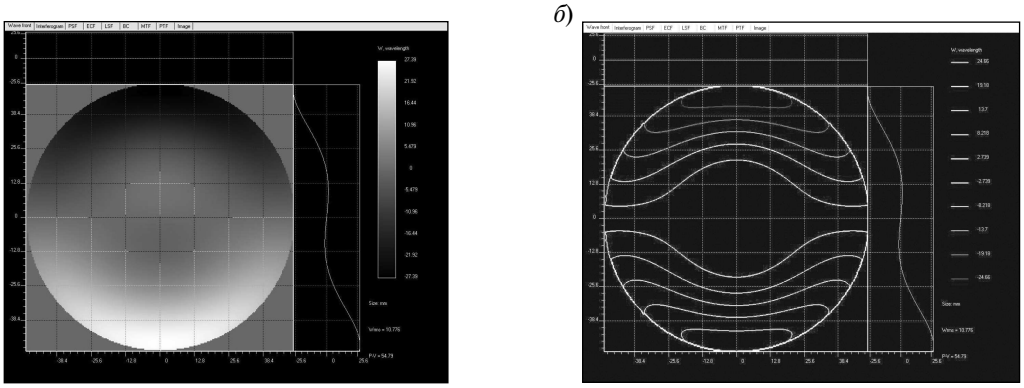
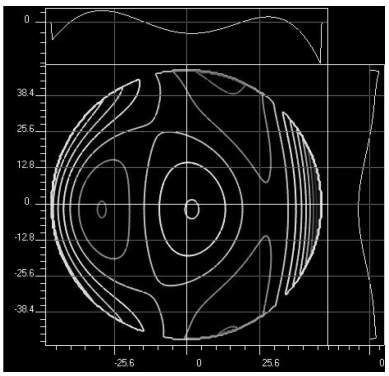


Рис. 4. Трансформация теневой картины Фуко (*а*) в систему полос (*б*) при расположении ножа горизонтально

а)



б)

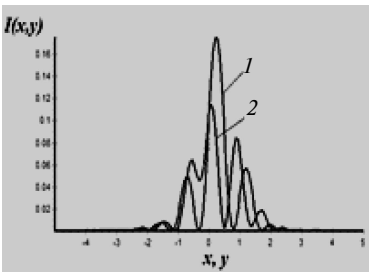
Размах =	0.446104
Максимум =	0.115948
Минимум =	-0.330156
Сферичность =	-0.0271053
Неравномерность =	0.44611
СКВО =	0.0637599

в)

Коэффициенты:

☐ C00 =	1.37333
☑ C20 =	-0.0135527
☐ C11 =	-0.00252533
☐ S11 =	1.91267
☑ C40 =	-0.0858799
☑ C31 =	-0.00561417
☑ S31 =	0.00989446
☑ C22 =	0.0626576
☑ S22 =	0.00606179
☑ C60 =	0.0127626
☑ C51 =	0.00617824
☑ S51 =	-0.0168607
☑ C42 =	0.0901242
☑ S42 =	-0.0046588
☑ C33 =	0.012257
☑ S33 =	0.0880487

г)



д)

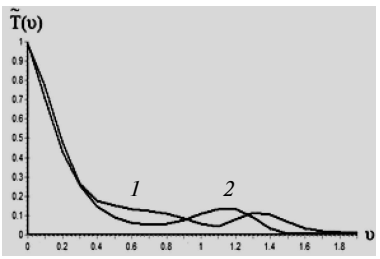


Рис. 5. Примеры характеристик качества оптических систем:
карта деформации исследуемогофронта (*а*), параметры деформации (*б*),
коэффициенты Цернике (*в*), функция рассеяния точки (*г*)
частотно-контрастная характеристика (*д*)

волнового фронта, таблицы коэффициентов Цернике [2], а также характеристик качества оптических систем (ФРТ, ФРЛ, ЧКХ и функция концентрации энергии в пятне рассеяния), как на рис. 5.

Предлагаемый модернизированный количественный теневой метод по сравнению с известными методами интерферометрии обладает несомненными преимуществами. Его основные достоинства — простота и доступность аппаратурного оснащения, возможность работы с применением излучения белого источника, возможность работы на любой выделенной длине волны, а также полная нечувствительность к вибрациям, в отличие от подавляющего большинства других интерферометров.

Благодаря модернизации и компьютеризации теневого метода ножа Фуко, созданы возможности для получения полной карты волнового фронта поверхности и системы, таблицы коэффициентов Цернике, а также возможности расчета на основании этих данных всех характеристик качества изображения, как на современных дорогостоящих интерферометрах типа ZYGO, Meller-Wedel и их аналогах [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ронки, В.** Испытание оптических систем [Текст] / В. Ронки.— М.-Л.: Гостехиздат, 1933.— 102 с.

2. Оптический производственный контроль [Текст] / Под ред. Д. Малакары.— М.: Машиностроение, 1985— 400 с.

3. **Витриченко, Э.А.** Методы исследования астрономической оптики [Текст] / Э.А. Витриченко.— М.: Наука, 1980.— 152 с.

4. **Кирилловский, В.К.**. Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем [Текст] / В.К. Кирилловский, Туан Ле Зуй.— СПбГУ ИТМО, 2008.— 131 с.

5. **Кирилловский, В.К.** Современные оптические исследования и измерения [Текст]: Учебное пособие / В.К. Кирилловский.— СПб.: Лань, 2010— 304 с.:

6. **Зацепина, М.Е.** *С*овременный метод количественной расшифровки теневой картины линейной решетки [Текст] / М.Е. Зацепина, В.К. Кирилловский // Междунар. конф. «Прикладная оптика-2012». — СПб НИУ ИТМО.— 2012. Т. 2. С. 130–133.

ЗАЦЕПИНА Марина Евгеньевна — *аспирант кафедры прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.*
197101, Кронверкский проспект, д. 49, лит. А, г. Санкт-Петербург, Россия
(812) 496-75-03
marichka_za@list.ru

КИРИЛЛОВСКИЙ Владимир Константинович — *кандидат технических наук, профессор кафедры прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики*
197101, Кронверкский проспект, д. 49, лит. А, г. Санкт-Петербург, Россия
vkkir@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 539.216.2:539.23:535.37

Д.А. Грачёв, А.И. Бобров, И.А.Чугров, А.В. Ершов, Д.А.Павлов

МАССИВЫ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ В МАТРИЦЕ SiO_2: СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА

D.A. Grachev, A.I. Bobrov, I.A. Chugrov, A.V. Ershov, D.A. Pavlov

ARRAYS OF SILICON NANOCRYSTALS IN SiO_2 MATRIX: STRUCTURE AND LUMINESCENT PROPERTIES

Исследовано влияние высокотемпературного (500–1100 °С) отжига на структурные и люминесцентные свойства многослойных нанопериодических структур (МНС) *a*-SiO_x/SiO_2, полученных испарением из двух независимых источников. Результаты изучения структуры методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии показали, что после отжига при 1000–1100 °С в SiO_x-слоях МНС формируются массивы вертикально упорядоченных нанокристаллов кремния с диаметрами, не превышающими исходной толщины слоев *a*-SiO_x, с поверхностной плотностью ~ 10^{12} $см^{-2}$. Полученные структуры с массивами нанокристаллов кремния характеризуются размернозависимой фотолюминесценцией при комнатной температуре в диапазоне длин волн 700–850 нм.

НАНОПЕРИОДИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА. ОТЖИГ. НАНОКРИСТАЛЛ КРЕМНИЯ. ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ. ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ.

The effect of high temperature (500–1100 °C) annealing of *a*-SiO_x/SiO_2 multilayered nanoperiodic structures (MNS) formed by evaporation from two independent sources have been investigated. With results of analyzing the structure by high-resolution transmission electron microscopy it was concluded that during annealing at 1000–1100 °C in *a*-SiO_x-layers of MNS vertically ordered arrays of silicon nanocrystals with a diameter not exceeding the initial thickness of *a*-SiO_x-layers, with surface density ~ 10^{12} cm^{-2} are formed. The resulting structure with arrays of silicon nanocrystals in SiO_2 characterized size-depended photoluminescence at room temperature in 700–850 nm- wavelength range.

MULTILAYERED STRUCTURE. ANNEALING. SILICON NANOCRYSTAL. ELECTRON MICROSCOPY. PHOTOLUMINESCENCE.

Считается [1], что упорядоченные массивы нанокристаллов кремния в широкозонной диэлектрической матрице позволят преодолеть принципиальные ограничения в технологии ряда кремниевых устройств (энергонезависимые элементы памяти [2] и светоизлучающие приборы [3, 4], интегрированные в типовой планарный процесс).

Интерес представляет изучение эволюции структурных и оптических свойств многослойных нанопериодических структур, полученных последовательным осаждением соответствующих аморфных пленок субоксида кремния (*a*-SiO_x) и диэлектрика, под действием высокотемпературного отжига [5, 6]. Термообработка при температурах 1000–1100 °С приводит к формированию в слоях SiO_x массивов нанокристаллов Si, разделенных диэлектриком (SiO_2) и упорядоченных в направлении роста структуры. Контролируемая вариация размеров и концентрации нанокристаллов в системе должны позволить управлять такими свойствами, как спектр и интенсивность люминесценции. Необходимость контроля структурно-морфологических свойств массивов нанокрислаллов Si требует применения трудоемких структурных исследований, в частности просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ВР ПЭМ)

в комплексе с оптическими спектральными методиками (см., например, [1]).

В данной статье представлены результаты исследования влияния высокотемпературного отжига на оптические и структурные свойства многослойных нанопериодических структур *a*-SiO_x/SiO_2, полученных при осаждении методом испарения в вакууме из раздельных источников.

Методы исследования

Аморфные многослойные нанопериодические структуры *a*-SiO_x/SiO_2 были осаждены на подложки из кремния *p*-типа (БКД 2300) методом попеременного вакуумного испарения соответствующих исходных материалов из двух независимых источников с применением косвенного фотометрического контроля толщины, как это описано в [6, 7]. Слои *a*-SiO_x формировались испарением SiO-пудры (марка ХЧ) из эффузионного источника, а слои *a*-SiO_2 — электронно-лучевым испарением плавленого кварца (марка С5–1). Температура подложки поддерживалась равной 200 ± 10 °С.

В табл. 1 приведены расчетные толщины слоев полученных наноструктур. Толщина слоев SiO_2 задавалась одинаковой — 2,8 нм, а отличались структуры толщиной слоев *a*-SiO_x. Во всех случаях первым на подложку наносился слой субоксида кремния, затем SiO_2, следующим — *a*-SiO_x и т. д., верхним был слой SiO_2. Общая толщина структур контролировалась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4.

Образцы разделялись на чипы, которые термически отжигались в атмосфере азота в течение двух часов. Каждый чип был отожжен при своей температуре в диапазоне 500±1100 °С с шагом (100 ±10) °С.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измерялись при комнатной температуре в диапазоне 350–900 нм при возбуждении азотным лазером (337 нм). Сигнал ФЛ детектировался с помощью ФЭУ-62 с использованием решеточного монохроматора SP-150 (Stanford Research Systems). Все измерения были выполнены в одинаковых условиях и с учетом спектральной чувствительности оптической схемы.

Исследование образцов методом инфракрасной (ИК) Фурье-спектроскопии проводились на спектральном комплексе Varian 4100 Excalibur (США) со спектральным разрешением 2 $см^{-1}$. Спектры коэффициента пропускания снимались при комнатной температуре с временным накоплением сигнала для повышения отношения «сигнал/шум».

Для получения изображений поперечных сечений многослойных структур методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения был использован микроскоп JEM-2100 F (JEOL, Япония). Масштабы снимков выбирались из условия достижения разрешения атомных плоскостей в нанокристаллах кремния и максимальной информативности об объектах. Предварительно образцы препарировались на оборудовании Gatan (США) по оригинальной методике утонения [8], включающей этапы последовательной механической обработки и финишного прецизионного ионного травления.

Определение структурно-морфологических параметров исследуемых структур из полученных с помощью ВР ПЭМ изображений включало статистическую обработку последних, построение кривых контраста и обратных Фурье-образов и проводилось с применением

Таблица 1

Характеристика исходных образцов *a*-SiO_x/ SiO_2

Номер образца	Обозначение*	Число слоев	Толщина слоев SiO_x, нм	Общая толщина МНС, нм
1	8/3 нм/нм	50	8,4	280 ± 15
2	4/3 нм/нм	62	4,4	225 ± 15
3	2/3 нм/нм	64	2,2	170 ± 15

* Примечание. Для обозначения многослойных нанопериодических структур (МНС) использованы средние величины толщин слоев *a*-SiO_x и SiO_2 (в нм), округленные до целых единиц.

программы анализа GWYDDION 2.26 [9]. Для определения размеров нанокристаллов использовались алгоритм «водораздела» и сглаживание изображения.

Результаты и обсуждение

Данные ИК-спектроскопии дают информацию о фазовых превращениях в многослойных наноструктурах SiO_x/SiO_2 под действием отжига [5, 6]. Поэтому рассмотрим сначала эти результаты. В табл. 2 приведены типичные наблюдаемые в этих структурах полосы ИК-поглощения и их идентификация по характерным, известным по публикациям (см. [5, 6] и ссылки там) пикам колебательных мод в отдельных фазах SiO и SiO_2. Видно, что по мере роста температуры отжига пики поглощения, характерные для Si-O-Si — мод колебаний в монооксиде кремния, трансформируются (при $T_{отж} \geq 700$ °C) в пики поглощения, свойственные модам колебаний в SiO_2. Это свидетельствует о том, что увеличение температуры отжига (в исследуемом интервале $T_{отж}$) приводит к последовательности физико-химических процессов в слоях SiO_x многослойных структур (как это подробно рассматривалось в [1, 5, 6]). Первоначально происходит фазовое разделение субоксида кремния на Si и SiO_2 по реакции: $2SiO_x \rightarrow xSiO_2 + (2-x)Si$. Затем идет образование нефазовых включений Si (кольцевые и латеральные), формирование аморфных, а в завершении — кристаллических нановключений кремния [1, 5, 6].

Отметим, что данные ИК-спектроскопии (см. табл. 2) однозначно подтверждают только образование отдельной фазы SiO_2 в слоях SiO_x при высокотемпературном отжиге. Подтверждение образования фазы и нанокристаллов кремния было установлено при изучении спектров ФЛ и результатов ВР ПЭМ отожженных структур a-SiO_x/SiO_2.

На рис. 1 представлены нормированные спектры ФЛ структур a-SiO_x/SiO_2 с разными периодами, отожженных при 1100 °C. Спектры фотолюминесценции характеризуются широкой линией излучения на длинах волн 650–850 нм — в области, типичной для световой эмиссии в результате излучательной рекомбинации экситонов в нанокристаллах кремния [1, 3–5]. Правильность идентификации этой полосы подтверждается и наличием эффекта «синего» смещения пика ФЛ при уменьшении толщины слоев SiO_x многослойных структур, как это можно увидеть на рис. 1.

Таким образом, при высокотемпературном отжиге в структурах SiO_x/SiO_2 формируются нанокристаллы кремния с поперечными размерами, ограниченными исходной толщиной слоев субоксида кремния. Уменьшение толщины слоев

Таблица 2

Полосы спектров ИК-поглощения многослойной наноперiодической структуры (образец № 2) и их фазовая идентификация при вариации температуры отжига

Положение пика, см$^{-1}$						Идентификация фазы по моде колебаний в Si–O–Si (положение пика поглощения)
Без отжига	При температурах °C					
	500	600	700	1000	1100	
Для фазы SiO						
440	440	440	–	–	–	TO-типа (435 см$^{-1}$) в SiO
880	880	880	–	–	–	Валентные колебания в изолированных Si-кольцах (880 см$^{-1}$)
1039	1050	1050	–	–	–	В гомогенном монооксиде SiO(1021 см$^{-1}$)
Для фазы SiO_2						
–	–	–	450	460	460	TO-типа (460 см$^{-1}$) в SiO_2
–	–	–	810	810	810	Изгибные (810 см$^{-1}$) в SiO_2
–	–	–	1060	1089	1089	Асимметричные валентные в SiO_2 (1080 см$^{-1}$) в SiO_2
1150	1150	1200	1200	1250	1250	Асимметричные LO-типа в SiO_2 (1100-1300 см$^{-1}$) в SiO_2

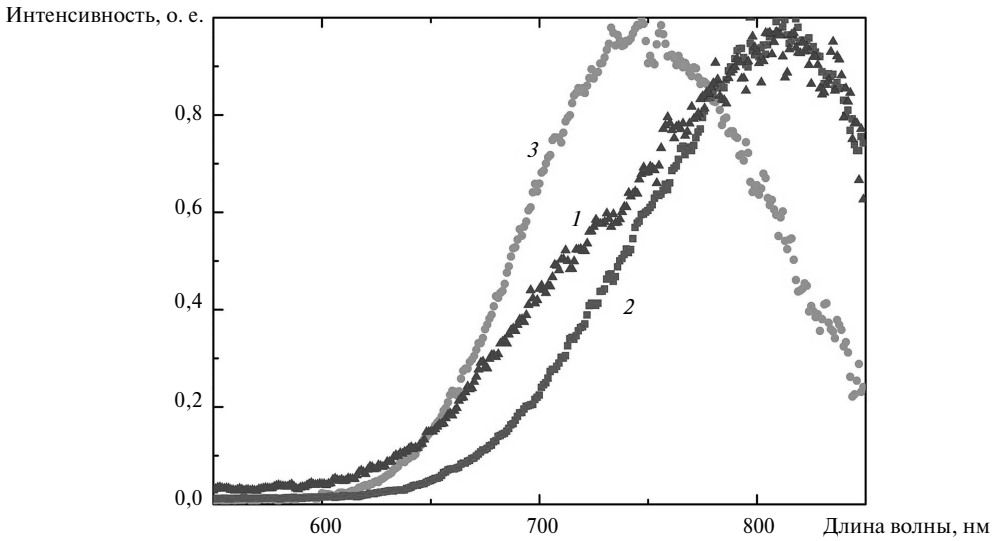


Рис. 1. Нормированные спектры фотолюминесценции многослойных наноструктур a-SiO_x/SiO_2 с разными периодами после отжига при 1100 °С. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 1

a-SiO_x в наностркturах от 8 до 2 нм приводит к снижению размера нанокристаллов Si и соответствующему уменьшению длины волны пика ФЛ от 800 до 750 нм (см. рис. 1). Синее смещение пика ФЛ структур сопровождается сужением спектров, что говорит об уменьшении дисперсии нанокристаллов по размерам. Ширина спектров на полувысоте составила 180, 130 и 120 нм, соответственно для образцов с периодами 8/3, 4/3 и 2/3 нм.

На рис. 2 представлено ПЭМ-изображение поперечного среза отожженной при 1100 °С МНС a-SiO_x/ SiO_2 с периодом 4/3 нм. На изображении светло-серый оттенок соответствует матрице SiO_2, в то время как нановключения Si представляются в виде более темных образований круглой формы. Подложка находится в нижней правой стороне рисунка и отделена от многослойной структуры темной границей.

Это ПЭМ-изображение дает, однако, несколько неожиданный результат. Из него не так очевидно, что нановключения Si формируются в слоях SiO_x, разделенных аморфными SiO_2 слоями, о чем сообщалось в [10]. Массивы нановключений Si не выглядят периодически упорядоченными в направлении роста, т. е. в направлении нормальном к подложке. Подобные проблемы интерпретации ПЭМ-изображений многослойных систем SiO_x/SiO_2 отмечались и ранее (см., например, [11]). В связи с этим нами был предпринят дополнительный методический подход в обработке ПЭМ-изображения. Исходя из предположения о параллельном расположении слоев SiO_2 и SiO_x к подложке было выбрано типичное изображение участка поперечного среза размером 70×70 нм и найдены значения интегральных интенсивностей контраста (почернение) в полосах шириной $\Delta z = 0{,}05$ нм, параллельных подложке. Математически данная процедура представляла собой поиск суммы значений в каждой строке двумерного массива чисел, соответствующего изображению. На рис. 2 результат представлен в виде шкалы интенсивности контраста по направлению нормали к подложке. Видно, что интенсивность контраста изменяется по направлению роста структур периодически. Период составил величину 7,5 ± 0,5 нм для отожженной структуры a-SiO_x/SiO_2 с периодом 4/3 нм, что хорошо согласуется с расчетным значением 7,2 нм для структуры перед напылением (см. табл. 1).

Изучение ПЭМ-изображений с более высоким разрешением (рисунки не приведены) показало, что обсуждаемые нановключения являются кристаллическими; в них четко выделяются атомные плоскости. Ориентация нанокристаллов

носит случайный характер. Таким образом, высокотемпературный отжиг многослойных нанопериодических структур a-SiO_x/SiO_2, полученных испарением из раздельных источников по нашей методике, приводит к формированию массивов случайно ориентированных нанокристаллов кремния в матрице SiO_2, положение которых упорядочено в направлении роста наноструктур.

Структурно охарактеризовать нанокристаллы кремния было возможно либо путем прямого измерения межплоскостных расстояний отдельных нанокристаллов, либо из Фурье-образа снимка, полученного методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Последний имеет аналог изображения электронной дифракционной картины в обратном пространстве и позволяет определять величины межплоскостных расстояний в нанокристаллах, попавших в поле снимка. На рис. 3 представлено изображение Фурье-образа снимка структуры № 2. Видны кольца, соответствующие определенным пространственным частотам. Четко выраженные «рефлексы» дают Фурье-образы межатомных плоскостей нанокристаллов. Для исследуемого образца наноструктуры a-SiO_x/SiO_2 с периодом 4/3 нм хорошо выделяются межплоскостные расстояния со значениями $0{,}32 \pm 0{,}01$, $0{,}191 \pm 0{,}002$ и $0{,}135 \pm 0{,}004$ нм, которые согласуются [1] со значениями межплоскостных расстояний в кристаллическом кремнии в направлениях [111], [220], [311]. Таким образом, мы имеем дело именно с кремниевыми нанокристаллами.

Определение размера кремниевых нанокристаллов Si по ВР ПЭМ-изображению (см. рис. 2) дало средний диаметр нанокристаллов, равный $4{,}6 \pm 1{,}5$ нм. Оценка поверхностной плотности нанокристаллов кремния на единицу площади поперечного сечения дает величину порядка 10^{12} см$^{-2}$. Сравнение среднего размера нанокристаллов и исходной толщины слоев a-SiO_x в многослойной наноструктуре свидетельствует о том, что барьерные слои SiO_2 играют роль ограничителя роста размеров кристаллических нановключений кремния при высокотемпературном отжиге.

В заключение подведем основные итоги проведенного исследования. Методами высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии и спектральной фотолюминесценции исследовано влияние высокотемпературного отжига на структурно-морфологические и оптические свойства многослойных

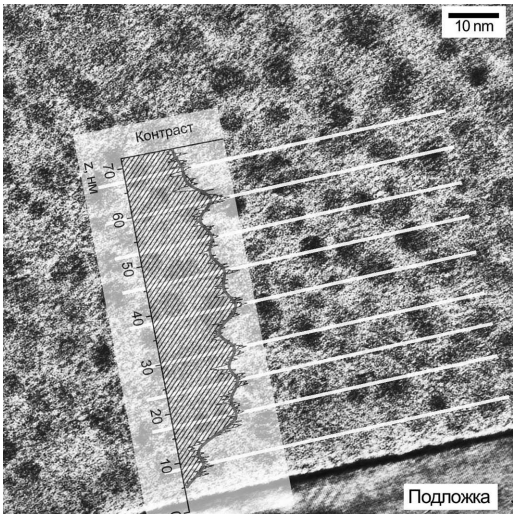


Рис. 2. Изображение поперечного среза образца № 2, отожженого при температуре 1100 °С (получено методом просвечивающей электронной микроскопии).

Матрице SiO_2 и нановключениям Si отвечают соответственно светло-серый и темный тона. Приведена зависимость интегралльной интенсивности контраста от z-координаты роста многослойной наноструктуры; светлые линии проведены через максимумы кривой (см. пояснения в тексте)

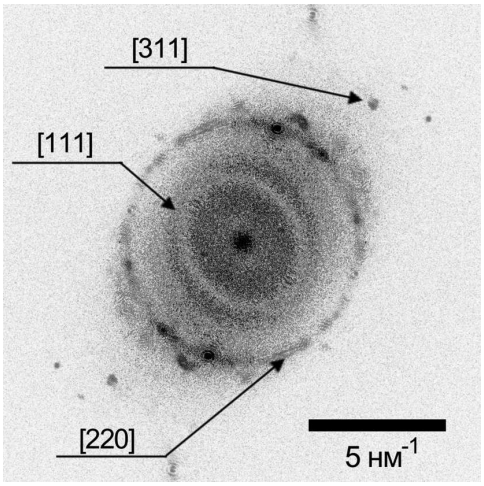


Рис. 3. Фурье-образ ВРПЭМ снимка структуры, изображенной на рис. 2. Приведены направления кристаллической решетки кремния

нанопериодических структур a-SiO_x/SiO_2, полученных методами испарения из независимых источников (SiO и SiO_2). Показано, что в результате высокотемпературного отжига в многослойных нанопериодических структурах формируются массивы вертикально упорядоченных нанокристаллов кремния с диаметрами, не превышающими исходной толщины слоев a-SiO_x, с поверхностной плотностью порядка 10^{12} см$^{-2}$. Структуры с нанокристаллами Si в матрице SiO_2 характеризуются размернозависимой фотолюминесценцией при комнатной температуре в диапазоне длин волн 650–850 нм.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и гранта РФФИ 10–02–00995.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pavesi, L.** Silicon Nanocrystals [Text] / L. Pavesi, R. Turan.— Fundamentals, Synthesis and Applications.— Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.— 627 p.

2. **Lu, T.Z.** Si nanocrystal based memories. Effect of the nanocrystal density [Text] / T.Z. Lu, M. Alexe, R. Scholz [et al.] // J. of Appl. Phys.— 2006. Vol. 100.— P. 014310(1–5).

3. **Wang, M.** Light emitting devices based on nanocrystalline-silicon multilayer structure [Text] / M. Wang, A. Anopchenko, A. Marconi [et al.] // Physica E.— 2009. Vol. 41.— P. 912–915.

4. **Ding, L.** Laterally-current-injected light-emitting diodes based on nanocrystalline-Si/SiO_2 superlattice [Text] / L. Ding, M.B. Yu, X. Tu [et al.] // Optics Express.— 2011. Vol. 19, № 3.— P. 2729–2738.

5. **Yi, L.X.** Si rings, Si clusters, and Si nanocrystals—different states of ultrathin SiO_x layers [Text] / L.X. Yi, J. Heitmann, R. Scholz [et al.] // Appl. Phys.Lett.— 2002. Vol. 81, № 22.— P. 4248–4251.

6. **Ершов, А.В.** Эволюция оптических свойств при отжиге многослойной нанопериодической системы SiO_x/ZrO_2, содержащей нанокластеры кремния [Текст] / А.В. Ершов, Д.И. Тетельбаум, И.А. Чугров [и др.] // Физика и техника полупроводников.— 2001. Т. 45. Вып. 6.— С. 747–753.

7. **Чугров, И.А.** Фотолюминесценция и комбинационное рассеяние света в периодических массивах нановключений кремния в диоксиде циркония [Текст] /И.А. Чугров, А.А. Ершов, А.В. Нежданов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2010. № 1(94).— С. 71–78

8. Precision Ion Polishing System: User's Guide. Gatan inc, 1998 118 с. [Электронный ресурс] URL: http://www.chem.hanyang.ac.kr:8001/hanyang/professor6/upload/691[1].PIPSr3.pdf (Дата обращения: 22.02.2012).

9. Gwyddion— Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software: [Сайт]. URL: http://gwyddion.net/ (дата обращения: 10.09.2011).

10. **Zacharias, M.** Size-controlled highly luminescent silicon nanocrystals: a SiO/SiO_2 superlattice approach [Text] / M. Zacharias, J. Heitmann, R. Scholz, [et al.] // Appl. Phys. Lett.— 2002. Vol. 80, № 4.— P. 661–664.

11. **Puglisi, R.A.** Charge transport in ultrathin silicon rich oxide/SiO_2 multilayers under solar light illumination and in dark conditions [Text] / R.A. Puglisi, C. Vecchio, S. Lombardo [et al.] // J. Appl. Phys.— 2010. Vol. 108.— P. 023701(1–7).

12. **Миркин, Л.И.** Справочник по ренгеноструктурному анализу поликристаллов [Текст] / Л.И. Миркин.— М.: Физматлит, 1961.— 859 с.

ГРАЧЕВ Денис Александрович — *магистрант физического факультета Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского.*
603950, пр. Гагарина, 23, корп. 3, Нижний Новгород, Россия
(831) 462-33-06,
grachov@phys.unn.ru

БОБРОВ Александр Игоревич — *магистрант физического факультета Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского.*
603950, пр. Гагарина, 23, корп. 3, Нижний Новгород, Россия
(831) 462-33-06
bobrov@phys.unn.ru

ЧУГРОВ Иван Александрович — *младший научный сотрудник научно-исследовательского физико-технического института Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского.*
603950, пр. Гагарина, 23, корп. 3, Нижний Новгород, Россия
(831) 462-33-06,
chugrov@phys.unn.ru

ЕРШОВ Алексей Валентинович — *кандидат физико-математических, наук доцент физического факультета Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского.*
603950, пр. Гагарина, 23, корп. 3, Нижний Новгород, Россия
(831) 462-33-06,
ershov@phys.unn.ru

ПАВОВ Дмитрий Алексеевич — *доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского.*
603950, пр. Гагарина, 23, корп. 3, Нижний Новгород, Россия
(831) 462-33-06,
pavlov@unn.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 684.4.043

О.Г. Ярусова

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ ДЕТСКОЙ МЕБЕЛИ ДЛЯ ДОШКОЛЬНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ

O.G. Yarusova

MODULAR ELABORATION OF CHILDREN FURNITURE FOR PRESCHOOL EDUCATIONAL INSTITUTIONS

При разработке данного проекта были поставлены следующие цели и задачи: сократить площадь основных помещений, организовать пространство для нормального развития 12 детей от 3 до 7 лет, увеличить количество мест в дошкольном образовательном учреждении. Данный проект можно применять в государственных дошкольных образовательных учреждениях, частных детских садах и др.

ДИЗАЙН. МЕБЕЛЬ. РАЗРАБОТКА. ДЕТИ. МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА.

In the design of the project were given the following goals and objectives: reduce the area of the main premises for the normal development of the 12 children from 3 to 7 years, increase the number of places in pre-school educational institution. This project it is possible to apply in state pre-school educational institutions, private kindergartens, etc.

DESIGN. FURNITURE. DEVELOPMENT. CHILDREN. MODULAR SISTEM.

В России остро стоит проблема нехватки мест в детских садах, в частности очередь в детские сады Санкт-Петербурга составляет более 5 000 человек. Один из способов решения этой проблемы — создание рациональной планировки и оснащения дошкольных образовательных учреждений, что позволит повысить наполняемость детей в группах.

Уклад жизни детей в детских садах организуется в рамках рационального режима и чередования игр, занятий, посильного труда и отдыха. Забота о здоровье и правильном физическом развитии детей — одна из важнейших задач детского сада. Ее решение обеспечивается правильным режимом дня, рациональным питанием, закаливанием детского организма, профилактическими мероприятиями, гимнастическими упражнениями, медицинским надзором. В режиме много времени отводится разнообразным играм, в том числе дидактическим — на развитие речи, слуха, счета, на распознавание цвета, формы и т. д.

Окружающая среда должна быть организована с учетом возможностей самого ребенка в каждый период его развития. Именно поэтому оформление помещения группы в детском саду играет большую роль в воспитании детей. Малыш находится здесь весь день, и окружающая обстановка радует его, способствует пробуждению положительных эмоций, воспитанию хорошего вкуса.

Актуальность проблемы, ее значимость подтверждается грантами и конкурсами, объявленными по данной тематике:

в рамках «Года Германии» в 2012 году продолжен грант на софинансирование проектов для детей;

объявлен конкурс на создание детской передвижной площадки (для GoGo Squeez. США);

появились детские телевизионные каналы, такие как «Карусель», «Nickelodeon», «Bibigon», «Disney Channel».

Наш проект ориентирован на оптимальную компоновку используемых помещений для максимально гармоничного развития детей, объединение их основных функций в одном помещении в соответствии со СНИП.

Идея проекта заключается в сокращении используемых площадей в ДОУ за счет трансформируемой модульной системы.

В качестве основных методов исследования использовался поиск стилистических аналогов, построение концепции, методическая переработка научных и теоретических результатов, компьютерное моделирование в программах SolidWorks, 3DS MAX, изготовление твердотельных поисковых и окончательных макетов на установке прототипирования (рис. 1).

В живой природе особенности формы возникают в результате эволюционного развития. Такие формы, как правило, имеют характеристики, приближенные к оптимальным с точки зрения разных критериев (плотность упаковки и т. д.).

Исследование природных форм и закономерностей их образования может позволить достичь определенных результатов при проектировании реальных объектов, обладающих схожими признаками. Как правило, такие признаки могут серьезно отличаться от правил и признаков, заложенных в определенные производства промышленных изделий, механизмов, машин и основанных на иных признаках формообразования. В связи с этим возникает задача по созданию средств проектирования объектов сложной формы с использованием новых алгоритмических и конструктивных подходов, которые позволяли бы проектировать объекты, близкие к природным формам.

В качестве аналогов рассматривались различные модульные системы, начиная от биологических аналогов (таких, как ДНК, листья деревьев) и заканчивая современными играми (конструктор «лего», тетрис, мозаика) (рис. 2).

Для нормального развития одной группы детей в возрасте от 3 до 7 лет в количестве 12 человек необходимо использовать минимум четыре основных помещения [1, 5]: спальню, игровую, залы для спортивных и музыкальных занятий. Общая площадь этих помещений составляет 320 м^2.

В разработанном проекте предлагается использовать только одно помещение (116 м^2), в котором объединены функции спальни, игровой, залов для спортивных и музыкальных занятий.

Основой трансформируемой модульной системы служит базовый конструктивный модуль сложной формы (рис. 3), которая позволяет создавать следующие объекты в детской комнате: кроватку, стол и стульчики, разнообразные игровые системы. Таким образом, освобождается площадь для дополнительных групп.

Трансформируемый модуль имеет стороны длиной 44 см, высоту 30 см. Он весит 500 г. Модуль легко моется, не поглощает влагу, долговечный, экологически и гигиенически безопасный, не имеет острых краев, может быть выполнен в разнообразной цветовой гамме. Имеет два слоя: внутренний слой состоит из мягкого эластичного полиэтилена с высоким коэффициентом упругости, гигиенически и экологически безопасного в соответствии с СанПин [3], толщина его — 6 мм,

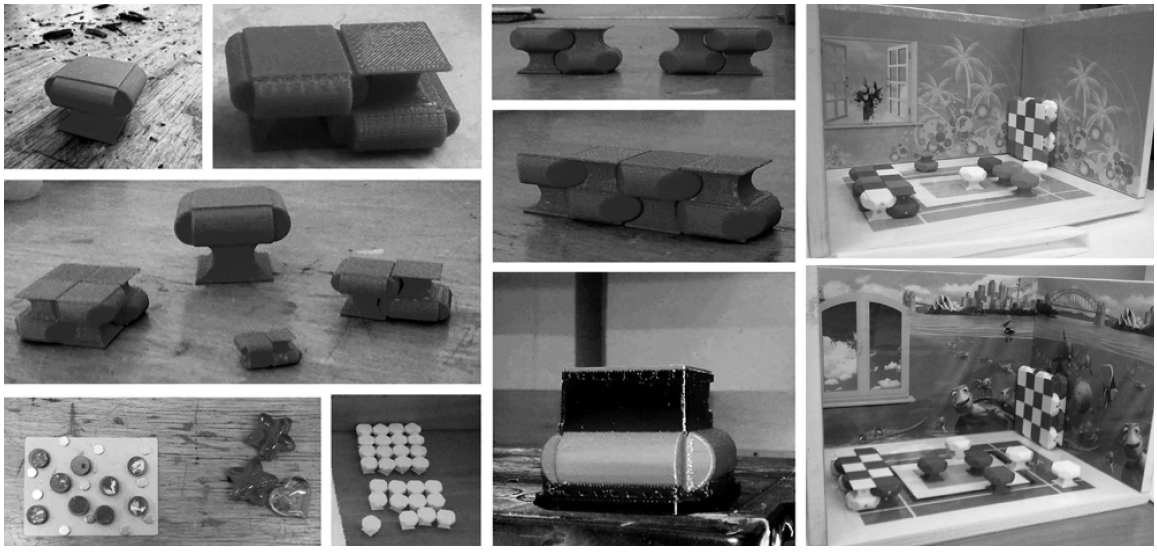


Рис. 1. Твердотельные макеты базовых конструктивных модулей, выполненные по технологии быстрого прототипирования

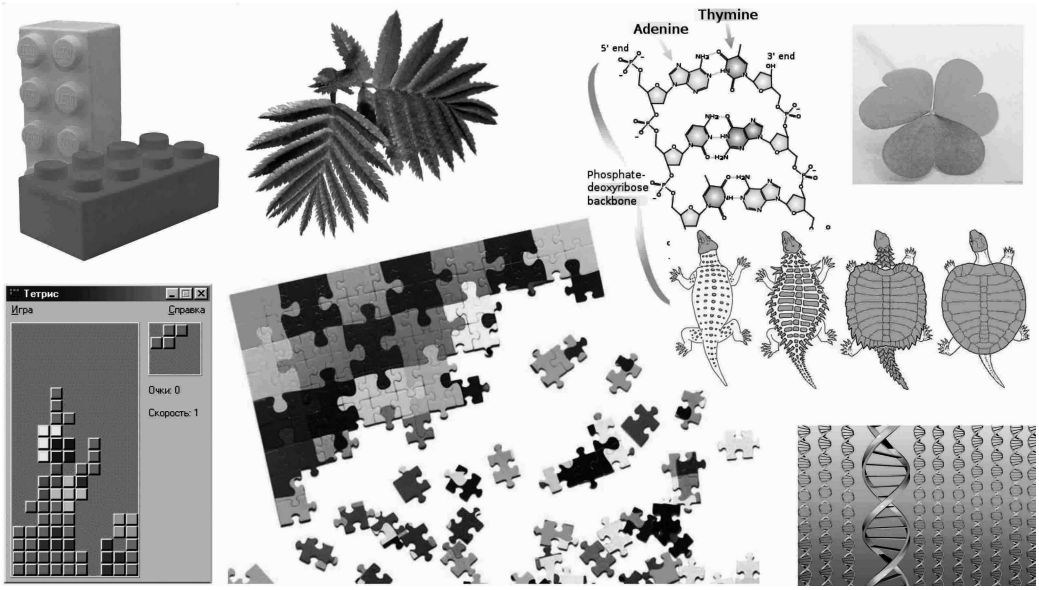


Рис. 2. Природные аналоги модульной системы

что достаточно для обеспечения требуемой жесткости и прочности конструкции; внешний слой выполнен из вспененного пенополиуретана толщиной 10 мм и создает мягкое демфирующее покрытие [4].

Между этими двумя слоями расположены виниловые магниты. Согласно гипотезе Ампера магнитные поля соседних модулей взаимопоглащаются. Благодаря этому свойству магнитные поля не создают угрозы для здоровья ребенка.

Разнообразная цветовая гамма модуля достигается добавлением пигмента в массу полимера или порошковым окрашиванием поверхности готового модуля.

Универсальное помещение имеет две основных компоновочно-функциональных схемы, разработанных с учетом распорядка дня для детей и проработки основных ситуационных моментов в игровой и в спальне, где во время дневного сна модули трансформируются в детскую кровать. Для упрощения и облегчения работы

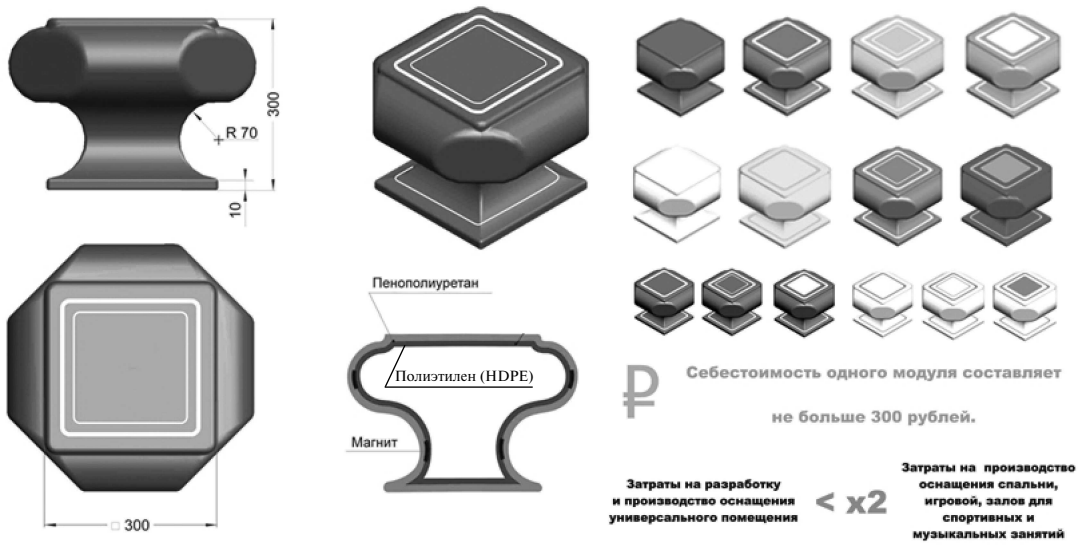


Рис. 3. Трансформируемый мебельный модуль

воспитателя предложена бельевая концепция, в которой покрывало служит промаркированным именем ребенка чехлом для индивидуального комплекта белья. Матрасы выполнены из пенополиуретана, подушка и одеяло сделаны из синтепона. После сна белье укладывается в шкафы, а трансформеры остаются в качестве игровых модульных систем (рис. 4).

Для проектирования отдельных зон в детской комнате — пространства для занятий, игр, хранения вещей и игрушек — используются (аналогично «взрослой» комнате) универсальные правила. Главное — сохранить для ребенка ощущение доступности всех элементов в комнате, обеспечить удобство подхода к мебели, открывания дверок и выдвигания ящиков.

Если необходимо освободить зал для спортивных и музыкальных занятий, театральных представлений, модули складируются вдоль стенки в амфитеатр.

Благодаря компактным размерам и малому весу модульной системы, процесс сборки простой, приятный и занимает мало времени.

Себестоимость одного модуля составляет 250 рублей. Стоимость разработки и производства такого оснащения универсальной комнаты в два раза меньше затрат на производство оснащения основных помещений.

В зависимости от расположения универсального помещения относительно южной и северной сторон предложена теплая и холодная цветовые гаммы помещения [2].

Все материалы, используемые в проекте, могут быть подвержены вторичной переработке, соответствуют СанПиН-ам, СНиП-ам и ГОСТ-ам по проектированию дошкольных образовательных учреждений [1, 3].

Создание модульной системы позволит сократить площади используемых помещений для одной группы детей, освободить площади для дополнительных групп и, таким образом, увеличить наполняемость помещений в пределах, допускаемых СанПиН. Данный проект позволяет упростить и облегчить работу воспитателей, свести к минимуму оборудование, используемое в помещении.

На основе анализа аналогов помещений для ДОУ и детской мебели сформированы стилистические, эргономические и конструктивные требования к помещениям для ДОУ. Создана рациональная планировка и разработано оснащение дошкольных образовательных учреждений, что позволит повысить наполняемость детей в группах. Площади в ДОУ сокращены за счет трансформируемой модульной системы.

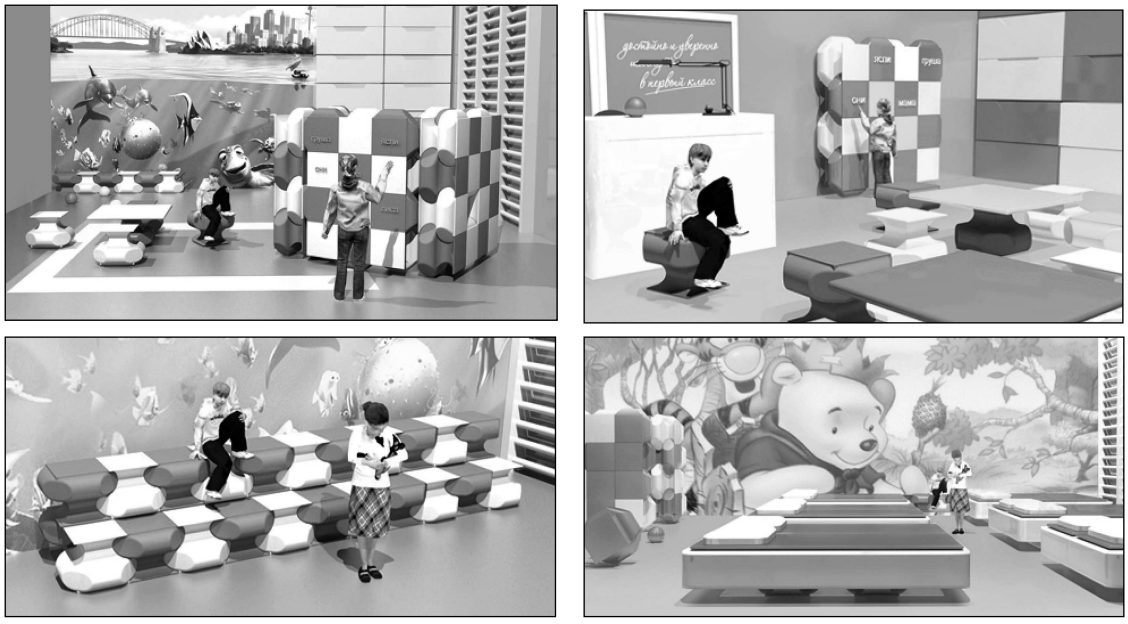


Рис. 4. Модульная система в интерьере

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование и строительство здания детского сада [Электрон. ресурс] / http://otherreferats.allbest.ru/construction/00124767_0.html

2. Цвет в интерьере [Электрон. ресурс] / http://psymania.info/raznoe/330.php

3. **СанПиН 2.4.1.2660–10**. Санитарно-эпидемиологические требования к устройству, содержанию и организации режима работы в дошкольных организациях [Текст].

4. Пластмассы [Электрон. ресурс] / http://ppmarket.narod.ru/Slovar/plastic_slovar.htm

5. Правительство СПб. Комитет по образованию [Электрон. ресурс] / http://k-obr.spb.ru/preschool/

ЯРУСОВА Ольга Геннадьевна — *аспирант кафедры инженерной графики и дизайна Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552–7514
yarusovaso@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 53.06:665.6/.7

А.А. Галичина, А.Ю. Карсеев,
В.В. Давыдов, В.И. Дудкин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ НЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ПРЕДПРИЯТИЙ

A.A. Galichina, A.Yu. Karseev,
V.V. Davydov, V.I. Dudkin

THE USE OF FUEL OIL EMULSION FOR THE POWER INSTALLATIONS ON ENTERPRISES

В статье рассмотрены проблемы утилизации нефтяных пленок, образующихся после вторичной сепарации нефти. Предложен новый метод подготовки топливных нефтяных эмульсий для эффективного использования их в топках энергетических установок. Найден новый подход к эффективному измерению концентраций воды и нефти в текущем потоке бинарной смеси.

НЕФТЯНАЯ ЭМУЛЬСИЯ. ТОПЛИВНАЯ НЕФТЯНАЯ ЭМУЛЬСИЯ. СЕПАРАЦИЯ. ЯДЕРНО-МАГНИТНЫЙ РЕЛАКСОМЕТР. ВРЕМЯ ПРОДОЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ T_1.

In clause problems of oil skins utilization are considered. These skins are formed after secondary oil separation. The new method of fuel oil emulsions preparation for their effective use in power installation fireboxes has been proposed. The new approach to effective measuring of the concentrations of water and oil in the binary mixture flowing stream has been found.

OIL EMULSION. FUEL OIL EMULSION. SEPARATION. NUCLEAR — MAGNETIC RELAXOMETER. SPONTANEOUS RELAXATION TIME T_1.

С непрерывным развитием промышленности и постоянным ростом численности населения увеличиваются потребности в жидком топливе и других продуктах нефтяной отрасли. Возрастают добыча, объемы транспортировки и переработки нефти, а также отходы нефтяной промышленности. Особый интерес представляют нефтяные остатки (осадки) — шлам после сепарации нефти и топлива, отходы чисток судового оборудования (в основном танкеров), нефтяные протечки судовых механизмов и др. Причем количество отходов сепарации нефти и нефтяных топлив зависит от типа используемого топлива, от цикла сепарации (первичная или вторичная) [1, 2].

В представленной статье рассматриваются нефтяные топливные эмульсии, которые будут изготовлены из нефтяных пленок. Под нефтяной пленкой (НП) имеется в виду смесь воды и нефти с содержанием нефти в этой смеси не более 30 %. Эти пленки образуются после второго цикла сепарации нефтяных остатков [3, 4]. Количество таких остатков ориентировочно может быть оценено как 1,5–2,0 % от ежедневного расхода топлива при работе на тяжелой нефти, которая в основном добывается в нашей стране, и продуктах ее переработки [5]. При этом остатки в топливных танках могут достигать 7 % от количества находящегося в нем тяжелого топлива [4]. Это очень большое коли-

чество отходов, особенно если процесс идет непрерывно [2, 5].

Общее у всех нефтяных отходов то, что их достаточно трудно очищать. Но нефтяные пленки представляют самую большую проблему с точки зрения охраны окружающей среды [6]. Дальнейшее получение нефти и других продуктов из нефтяных пленок экономически невыгодно из-за низкой рентабельности [3].

В настоящее время нефтяные пленки (НП) подвергаются разрушению специальными деэмульгирующими реагентами, используются также выщелачивание (продукты, которого в последующем также нуждаются в очистке) и биодеградация [1–3, 7]. Все эти методы нуждаются в специальном полигоне для захоронения остатков. Требуется много территории и постоянное проведение работ на ней и т. д.

Образование топливных нефтяных эмульсий

Топливные нефтяные эмульсии в количествах, которые представляют интерес для использования их в энергетических установках, образуются в основном на нефтеперерабатывающих предприятиях или в портах, где происходит вторичная сепарация нефти и нефтепродуктов.

На выходе трехфазного стандартного сепаратора получается нефть, вода и нефтяная пленка [3, 8]. Чтобы НП можно было использовать в качестве топлива для устойчивой работы топок надо снизить в них содержание воды до 30 % и равномерно распределить воду в потоке подаваемого горючего [9, 10].

Мы поставили перед собой задачи:

разработать метод подготовки нефтяных топливных эмульсий из НП для эффективного использования в топках энергетических установок;

разработать систему контроля содержания воды в топливных нефтяных эмульсиях и экспресс-контроля качества очищенной от НП воды.

Подготовка топливных нефтяных эмульсий и систем контроля

Эмульсии представляют собой дисперсные системы из двух взаимно мало- или нерастворимых жидкостей, в которых одна диспергирована в другой в виде мельчайших капель — глобул.

После вторичной сепарации нефтяных отходов в качестве вторичных отходов образуется смесь воды и нефти с малой долей нефти в смеси, т. е. нефтяная пленка, как ее принято называть в технологическом процессе сепарации. Содержание нефти в ней не превышает 30 % [3–5]. Был разработан метод подготовки этой нефтяной эмульсии ее для переработки в топливную нефтяную эмульсию (ТНЭ) пригодную в качестве топлива энергетических установок. На рис. 1 представлена упрощенная технологическая схема процесса подготовки ТНЭ, соответствующая разработанному методу.

Нефтяная пленка, содержащая до 80 % воды, поступает в специальный резервуар, в котором она нагревается до температуры 30–35 °С. В резервуаре происходит частичное разделение фракций под действием силы тяжести [7]. На выходе из резервуара содержание воды в жидкой среде не превышает 65 %. Для точного определения соотношения концентраций вода и нефти используется ядерно-магнитный релаксометр (ЯМР) проточного типа. Данное соотношение необходимо знать для управления трехфазовой центрифугой с целью достижения максимально эффективной сепарации [6–8]. Дальше, чтобы облегчить процесс разделения воды и нефти, жидкую среду подвергают электрообработке, пропуская ее поток через переменное электрическое поле промышленной частоты напряженностью в десятки кВ/см [3]. Аналогичный процесс используется в цикле вторичной сепарации НЭ [4].

После сепарации получаем жидкую нефтяную среду (очень похожую на НЭ) — нефть с содержанием воды от 4 до 9 %. Дальнейшее получение нефти из этой среды экономически невыгодно. Поэтому ее смешивают с другими нефтяными остатками в специализированной установке ВКИ-4Б, которая используется в настоящее время на территории Северо-Западного региона. В качестве стабилизатора в установку добавляют побочный продукт переработки сланцевого масла — полимеры с молекулярной массой 5000–7000.

Эффективный контроль ТНЭ, полученной данным методом, удобно проводить приборами, принцип действия которых основан на явлении ядерного магнитного резонанса [9, 10]. Контроль количественного состава в ТНЭ необходим для

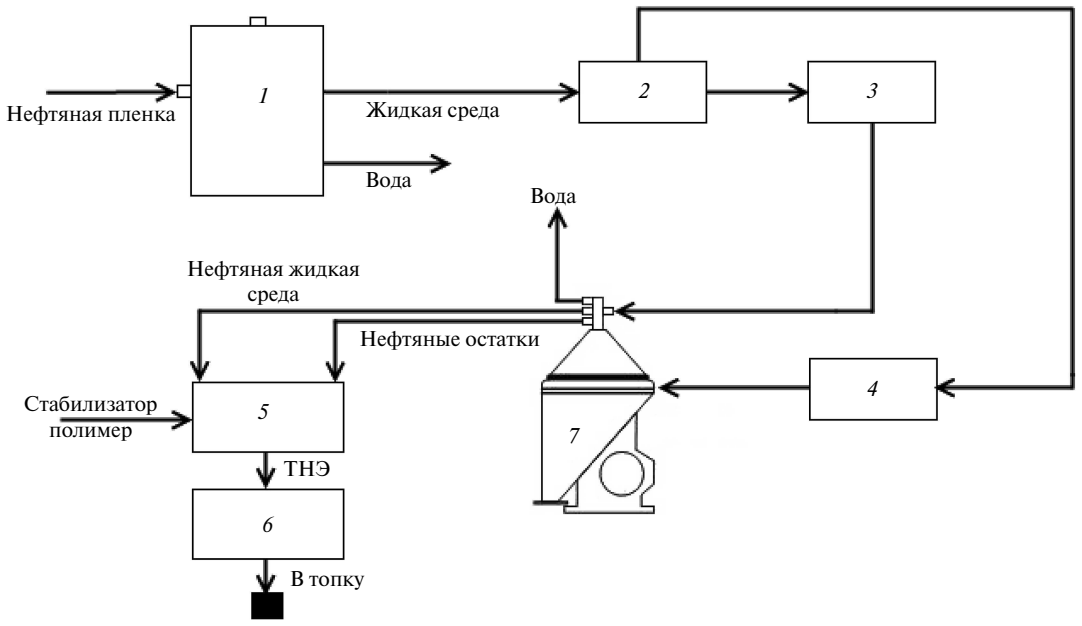


Рис. 1. Упрощенная технологическая схема процесса подготовки ТНЭ:
1 — специальный резервуар для отстаивания; *2* и *6* — ядерно-магнитный релаксометр; *3* — блок электрообработки; *4* — блок управления центрифугой; *5* — модернизированная ВКИ — 4Б; *7* — центрифуга

того, чтобы было выдержано процентное соотношение между нефтью, водой и стабилизатором. Иначе происходит срыв факела и затухание форсунки. Попытка вторичного пуска котлоагрегатов сопровождаются сильными хлопками и разрушением топок [3].

Контроль нефтяных пленок и топливных эмульсий

Поступающая на вход ЯМР релаксометра жидкая среда имеет вязкость, превышающую вязкость воды в 1,3–1,4 раза, кроме того, она нагрета до температуры чуть больше 30 °С. По этим причинам использовать эффективно работающий ЯМР спектрометр в цикле вторичной сепарации нефти [9, 10] затруднительно в силу конструктивных особенностей. Поэтому была разработана конструкция проточного ЯМР релаксометра, собранного по схеме меточного ЯМР расходомера [11, 12]. В собранной конструкции были также учтены особенности измерений НЭ, представленные в [10].

Так как времена продольной релаксации T_1 нефти и воды значительно различаются по величине, для определения процентного состава этой жидкой среды был реализован метод определения T_1, основанный на измерении оптимальной индукции радиочастотного поля в катушке регистрации.

Данный метод основан на решении уравнений Блоха, трансформированных по методу Вагнеса, для ламинарного течения жидкости [13–15]. В этом случае сигнал ЯМР максимален только при определенной амплитуде индукции переменного магнитного поля $B_{1\text{опт}}$ в приемной катушке, которая следующим образом зависит от времен продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации:

$$\gamma B_{1\text{опт.}} = (T_1\ T_2)^{-1/2},$$

где γ — гиромагнитное отношение ядра.

Время поперечной релаксации T_2 определяется по затуханию «виглей» сигнала ЯМР [11]; далее, измеряя $B_{1\text{опт}}$, соответствующее максимальной амплитуде сигнала ЯМР, вычисляем T_1. Экспериментально установлено, что для чистой нефти и воды оптимальные напряжения радиочастоты на приемной катушке составляют соотношение 3 к 1 [11, 13]. Для смеси соотношение изменится и будет иметь промежуточный характер. На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость амплитуды сигнала ЯМР от времени продольной релаксации T_1 жидкой среды при различных температурах.

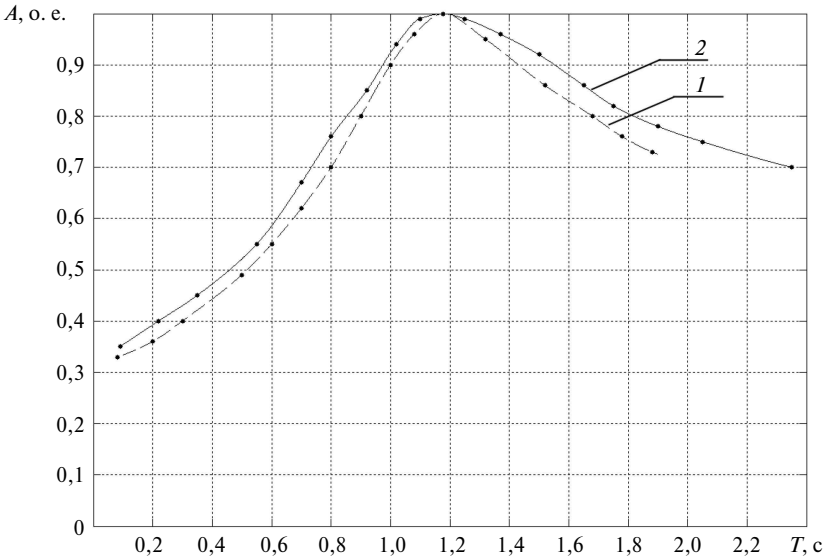


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигнала ЯМР от времени продольной релаксации жидкой среды при температурах: 10 (*1*) и 25 (*2*) °С

Жидкая среда была изготовлена путем смешивания тяжелой нефтяной фракции с T_1 = = 64 мс при температуре 25 °С и водопроводной воды, отфильтрованной от механических примесей специализированным мембранным фильтром, с T_1 = 2,362 с при той же температуре. Полученные экспериментальные значения показывают, что в области температур от 10 до 30 °С изменения в амплитуде сигнала ЯМР — незначительные, что позволяет после предварительной градуировки использовать разработанный нами ЯМР релаксометр для измерения T_1 в этом диапазоне температур.

Контроль процентного соотношения воды и нефти в полученной ТНЭ с помощью предложенного в работах [9, 10] ядерного магнитного спектрометра будет давать в показаниях через некоторое время большую погрешность (уменьшается площадь поперечного сечения отводящего трубопровода). Причина этого — в наличии полимерных стабилизаторов, которые присутствуют в виде крупинок, так как не могут полностью раствориться при таких температурах ТНЭ (крупинки образуют наросты и засоры на стыке с заборным элементом). Это приведет к тому, что заборная проба будет со временем все меньше и меньше отображать долевые части компонент жидкой среды. Поэтому для определения процентного соотношения воды и нефти также будем использовать описанную ранее в статье конструкцию проточного ЯМР релаксометра, которая не нарушает герметичность трубопровода и позволяет проводить бесконтактные измерения.

Полученные результаты измерений концентраций нефти и воды в жидкой среде и ТНЭ с помощью проточного ЯМР релаксометра в лаборатории нашего университета в пределах погрешности измерений (± 1 %) совпадают с измерениями концентрации нефти и воды в пробах от этой жидкой среды и ТНЭ при тех же температурах, проведенных на рентгеновском спектрометре S2 RANGER (фирма BRUKER) с погрешностью заведомо меньшей, чем у нашего прибора. Пробы исследовались в лаборатории Санкт-Петербургского национального минерально-сырьевого университета «Горный».

Полученная топливная нефтяная эмульсия полностью сгорает с конверсией углерода. Кроме того, возможно ее сжигание при малых концентрациях кислорода и более низких температурах, чем у других водно-топливных эмульсий. При ее сжигании снижаются больше чем на порядок выбросы в атмосферу полиароматических канцерогенных соединений, уменьшаются в два раза выбросы окислов азота, а также уменьшаются выбросы золы по сравнению с мазутом.

С экологической точки зрения преимущество предложенного метода получения ТНЭ в том, что не надо использовать щелочную очистку НП с последующим хранением на полигонах отработанных материалов, где в процессе очистки может быть повреждена дренажная система, что влечет за собой дополнительные расходы как на ее восстановление, так и на процесс утилизации отходов. Описанный в статье метод получения и использования ТНЭ имеет высокую экологическую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топливные эмульсии [Электронный ресурс].— http://www.afuelsystems.com/ru/water/water.html/.

2. Топливные эмульсии [Электронный ресурс].— http://www.ngpedia.ru/id617207p1.html/.

3. **Поконова, Ю.В.** Нефтепродуктосбережение (водотопливные эмульсии) [Текст] / Ю.В. Поконова.— СПб.: Рикон, 2010.— 172 с.

4. **Леффлер, У.** Переработка нефти [Текст] / У. Леффлер.— М.: Олимп-Бизнес, 2007.— 223 с.

5. **Алдакимов, Ф.Ю.** Теория, практика и переработка нефти ОАО «Сургутнефтегаз» [Текст] / Ф.Ю. Алдакимов.— Сургут: РИИЦ «Нефть Приобья», 2008.— 118 с.

6. **Беляков, В.Л.** Автоматический контроль нефтяных эмульсий [Текст] / В.Л. Беляков.— М.: Недра, 1992.— 262 с.

7. **Позднышев, Г.Н.** Стабилизация и разрушение эмульсий [Текст] / Г.Н. Позднышев.— М.: Недра, 1982. 222 с.

8. **Кашаев, Р.С.** Импульсная спектроскопия ЯМР структурно-динамического анализа нефтяных дисперсных систем [Текст] / Р.С. Кашаев, И.Н. Дияров.— Казань: Грандан, 2002.— 109 с.

9. **Kashaev, R.S.-H.** Nuclear magnetic relaxation iv vivo study method for determination of structure parameters of media/near cell and substrate/biomass concentration [Текст] / R.S.-H. Kashaev // European Biophysics Journal.— 1997. Vol. 26, № 1.— P. 130.

10. **Кашаев, Р.С.** Управляемая от релаксометра ядерного магнитного резонанса (ЯМР) установка для переработки нефтяных остатков, отходов нефтепереработки и стоков в топливные эмульсии [Текст] / Р.С. Кашаев // Современные наукоемкие технологии.— 2006. № 3.— С. 65–65.

11. **Жерновой, А.И.** Ядерно-магнитные расходомеры [Текст] / А.И. Жерновой.— Л.: Машиностроение, 1985.— 136 с.

12. **Давыдов, В.В.** Режим работы меточного ЯМР-расходомера на основе эффекта параметрического резонанса [Текст] / В.В. Давыдов, В.И. Дудкин// Известия высших учебных заведений. Приборостроение.— 2002. № 5.— С. 49–51.

13. **Abouelwala, M.C.** Optimization of continuous wave nuclear magnetic resonance to determine in situ volume fraction and individual flow rates in two component fraction and individual flow rates in two component mixtures [Текст] / M.C. Abouelwala, E.L. Kendell // Rev. Sci. Instr. 1979. Vol. 50, № 12.— P. 1545–1549.

14. **Давыдов, В.В.** Линия нутации ядерно-магнитного спектрометра с текущим образцом [Текст] / В.В. Давыдов, В.В. Семенов // Радиотехника и электроника.— 1999. Т. 44, № 12.— С. 1528–1531.

15. **Гиргидов, А.Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст] / А.Д. Гиргидов.— СПб.: Издательство Политехнического университета, 2007.— 545 с.

ГАЛИЧИНА Алина Андреевна — *студент института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 596-52-13
alinka.pirate@gmail.com

КАРСЕЕВ Антон Юрьевич — *студент института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 786-24-11
antonkarseev@gmail.com

ДАВЫДОВ Вадим Владимирович — *кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая д. 29, Санкт-Петербург, Россия
davydov_vadim66@mail.ru

ДУДКИН Валентин Иванович – *доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая д. 29, Санкт-Петербург, Россия
vidoodkin@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 543.426:539.16.04:556.53

А.В. Кулинкович, В.И. Гуменюк

КООПЕРАТИВНЫЙ ХАРАКТЕР ГЕНЕРАЦИИ ПЕРЕКИСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РАДИОЛИЗЕ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ УРАНИЛОВ

A.V. Kulinkovich, V.I. Gumenyuk

THE COOPERATIVE NATURE OF THE GENERATION PEROXY COMPOUNDS FOR RADIOLIZIS OF THE AQUEOUS SOLUTIONS URANILS

Обоснована актуальность создания экспрессного метода контроля соединений урана в природных водах. Исследуется нелокальный перенос электронов при возбуждении ассоциатов воды широкополосным электромагнитным излучением и влияние радиолиза на генерацию активных форм кислорода в водных растворах металлов переменной валентности. Сделан вывод о кооперативном характере генерации ион-радикалов, что связывается с электромагнитным возбуждением ион-кристаллических ассоциатов воды и их фазовой трансформацией, сопровождаемой образованием свободных радикалов.

ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ. ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА; СОЕДИНЕНИЯ УРАНА. ШИРОКОПОЛОСНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. РАДИОЛИЗ ВОДЫ.

Relevance of creation of an express control method of compounds of uranium in natural waters is proved. Not local transfer of electrons at excitement of associates of water by broadband electromagnetic radiation and influence radioliz on generation of active forms of oxygen in water solutions of metals of variable valency is investigated. The conclusion is drawn on cooperative nature of generation a radical ion that the ion-crystal associates of water and their phase transformation accompanied by formation of free radicals contacts electromagnetic excitement.

HEMILYUMINESTSENTNY EXPRESS CONTROL. GENERATION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN; COMPOUNDS OF URANIUM. BROADBAND ELECTROMAGNETIC RADIATION. RADIOLIZIS WATERS.

Развитие атомного комплекса более чем за пятидесятилетний период способствовало формированию и накоплению в России значительного ядерного потенциала. С одной стороны, создание и развитие ядерных вооружений было вынужденным шагом в ответ на противодействие США в условиях «холодной войны». С другой стороны, технологии, разрабатывающиеся для обеспечения этого комплекса, способствовали прогрессу России как в науке, так и в ведущих отраслях промышленности. В ходе развития радиационных технологий изменились экологическая и геохимическая картина мира — в природную среду поступило большое количество радионуклидов естественного и искусственного происхождения.

На территории России накоплено значительное количество радиоактивных отходов (РАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [1]. Территориальное распределение предприятий атомной отрасли охватывает весь бывший Советский Союз. На территориях, пострадавших в результате аварий на Чернобыльской атомной электростанции, на ядерно- и радиационно опасных объектах, а также в ряде мест утилизации кораблей и сосудов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) сложилась неблагоприятная радиационная обстановка. Серьезную потенциальную угрозу для населения представляет также прогрессивное накопление РАО, образующихся на территории городов и промышленных центров.

К числу ведущих причин радиоактивного загрязнения территорий (с учетом масштабов влияния на здоровье населения Земли и общее состояние биосферы обширных регионов) от-

носятся глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов, поступление радионуклидов в окружающую природную среду при производстве ядерного оружия и эксплуатации атомного флота, радиационное воздействие ядерно-топливного цикла в условиях нормальной эксплуатации, в аварийных ситуациях и при выходе из эксплуатации отслуживших нормативный срок объектов использования атомной энергии, выделение радона и продуктов его эманации из земной коры в различных физико-географических условиях.

Учитывая интенсивное развитие ядерных технологий в народнохозяйственной и военно-промышленной сферах, следует ожидать значительного накопления РАО и ОЯТ в мире и стране. Согласно [2] в настоящее время на территории России имеются 213 ядерных установок различного назначения (в основном это исследовательские реакторы и атомные станции), а также 1467 пунктов хранения ядерных реакторов в народном хозяйстве и 5194 различных радиационных источников. Приемлемый уровень ядерной и радиационной безопасности обеспечен на АЭС, предприятиях по производству топлива, на объектах, где используются источники ионизирующих излучений в науке и промышленности. В других областях, к сожалению, имеется много нерешенных проблем. Самое сложное – проблемы переработки ОЯТ и захоронения РАО.

В настоящее время РАО размещаются на 69 предприятиях. В Европейской части России отходы накоплены в 21 субъекте на 42 предприятиях, на Урале – в трех субъектах на 10 предприятиях, в Сибири – в пяти субъектах на 10 предприятиях. Сравнительно небольшие объемы отходов находятся на 7 предприятиях Дальневосточного региона [2].

В стране насчитывается более 30 различных типов хранилищ твердых РАО (здания, траншеи, бункеры, емкости, открытые площадки и т.д.) и более 18 видов хранилищ жидких РАО (емкости, открытые водоемы, пульпохранилища).

Большое разнообразие типов РАО вызвало появление в предыдущие годы огромного количества специфических технологий. В России есть уникальные технологии для переработки РАО, но нет средств на реализацию соответствующих проектов. Ни одна инновационная фирма ввиду значительной дороговизны не возьмется вкладывать деньги в эти технологии, это — государственная проблема. Ранее созданные и законсервированные хранилища не вполне соответствуют современным жестким международным требованиям безопасности. Заполнение эксплуатирующихся хранилищ РАО на некоторых АЭС составляет более 80 %, что еще более осложняет ситуацию в случае продления сроков эксплуатации станции.

Невозможно захоронение всех объемов РАО — более 600 млн м^3, накопленных в стране (1171 хранилище), в специально создаваемые могильники РАО. Кроме того, не все типы накопленных отходов возможно либо экологически и экономически целесообразно извлекать из существующих хранилищ. Проектами старых хранилищ не предусматривались решения по выводу их из эксплуатации, извлечению РАО и реабилитации территорий. Старение этих объектов интенсифицирует их уязвимость под действием различных внешних и внутренних факторов.

Заслуживают особого внимания промышленные и исследовательские ядерные установки (ИЯУ). Характерная особенность этих установок — их размещение, как правило, непосредственно в жилых и производственных зонах крупных промышленных центров (Москва, Санкт-Петербург, Димитровград и др.). В частности, в Москве и Московской области до недавнего времени эксплуатировались более 50-ти ИЯУ различного назначения [2]. Оборудование и технологические системы большинства ИЯУ морально и физически изношены; нормативно-технические документы обеспечения безопасности использования этих установок либо устарели, либо отсутствуют; продолжается утечка из состава эксплуатационного персонала высококвалифицированных кадров; нет достаточного финансирования для необходимой реконструкции установок.

Анализ и оценка радиоактивного загрязнения (РЗ) окружающей природной среды России вызывают серьезную тревогу. Пространственная оценка масштабов РЗ в России непосредственно связана с реально существующими предприятиями, добывающими и перерабатывающими уран, объектами ядерного военно-промышленного комплекса (ВПК), включая полигон на

Новой Земле, и атомной энергетики, океанского атомного флота, системой пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО), районами проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ) и существующими исследовательскими реакторами.

По состоянию на 01.01.2008 загрязненные радионуклидами территории (участки земель, водоемы) общей площадью 481,4 км^2 имеются на 25 предприятиях Росатома. Из них РЗ земли составляют 377 км^2 (78,3 %), а загрязненные водоемы — 104,4 км^2 (21,7 %). В том числе загрязнены 63,6 км^2 территории промплощадок, 197,9 км^2 территорий санитарно-защитных зон (СЗЗ) и в зонах наблюдения (ЗН) — 219,9 км^2. Распределение РЗ территорий по радионуклидному составу загрязнителей: подавляющая часть территорий загрязнена радионуклидами урана-238, цезия-137, стронция-90 и кобальта-60 (97,31 %) [2].

Анализ допустимых концентраций соединений урана показывает, что предельно допустимые содержания изотопов урана составляют микроколичества [3]. Следовательно, одной из важнейших задач в решении проблем радиационной безопасности является определение зараженности воды и почвы соединениями урана.

Ряд литературных источников [4, 5] указывают на то, что для воды и водных растворов характерны процессы кооперативного поведения, которые обусловлены особыми электрофизическими свойствами сопряженных структур связанной воды коллоидов.

Наличие кооперативных процессов в водных системах указывает на то, что в зависимости от состояния внешней среды меняется фазовое состояние водной системы, а соответственно, и характер процесса самоиндукции активных кислородных форм, который не связан с прямым ионизирующим действием излучения или наличием высокоэнергетических реакций прямого восстановления кислорода из воды.

В работе [4] авторами предложена кластерная модель воды, в основу которой положены нематически связанные состояния воды (ион-кристаллические ассоциаты). Согласно данной теории между нематической частью и поверхностной пленкой ассоциата находится структурированная жидкость с плоскими доменами кубического или тетрагонального льда, стабилизированными структурным давлением адсорбированной жидкости.

Согласно работе [4] ассоциаты, принадлежащие различным фазам кристаллического состояния воды, отличаются диэлектрическими характеристиками, а их ван-дер-ваальсово взаимодействие проявляется как притяжение для спектрально подобных молекул вводимого в жидкость вещества. В свою очередь, наличие сил притяжения для протоноакцепторных веществ у ассоциата положительной полярности и протонодонорных свойств у ассоциата отрицательной полярности создает условия для направленной диффузии веществ в соответствии со знаком их дальнодействующего взаимодействия. Следовательно, разрешенными направлениями диффузии веществ в полярной жидкости являются направления к центральной части нематика и вдоль границ нематика ассоциата. Посредством дальнодействующих сил в системе постоянно устанавливается неоднородное распределение растворяемых в жидкости веществ. При этом структурированные слои, содержащие кристаллическую фазу, ведут себя как центры адсорбции, создавая избыточное насыщение растворяющимися веществами относительно свободной жидкости.

Сверхпроводящее состояние среды обладает рядом свойств, обусловленных нелинейной динамикой параметра порядка, связанной обменными процессами с внешней средой.

В работе [4] также показано, что в сверхпроводящих структурах ион-кристаллических ассоциатов воды наблюдается прыжковая электронная проводимость. Так, способность слоистых сверхпроводящих структур к взаимодействиям с магнитными полями сверхмалой напряженности (интенсивностью менее 0,1 мТл) являются основой подобия свойств воды и сверхпроводящих материалов, магнитная чувствительность которых характерна лишь для джозефсоновских эффектов.

Суть эффекта Джозефсона состоит в том, что через изолирующую прокладку между двумя сверхпроводниками может протекать бездиссипативный, сверхпроводящий ток («туннелирование электронных пар»), при этом волновые функции электронов в обоих проводниках оказываются связанными. Если же ток через туннельный переход превысит критический, то

между сверхпроводимыми «берегами» возникает разность потенциалов. При этом связь волновых функций не нарушается, а принимает форму нестационарного эффекта Джозефсона. С позиций неравновесной динамики сверхпроводник представляет собой сильнонелинейный элемент. Его важнейшая особенность состоит в том, что нелинейность вольт-амперной характеристики проявляется при очень малых значениях тока и напряжения, чем и объясняется очень высокая чувствительность к слабым сигналам.

Таким образом, вода представляет собой сложную систему «ассоциированной» и «неассоциированной» («свободной») воды, причем ассоциированное состояние воды способно обладать свойствами сверхпроводников II рода. При этом в воде путем обменных взаимодействий куперовских пар и последующих химических превращений нормальных электронов энергия внешних электромагнитных полей низкой интенсивности преобразуется в энергию активных форм кислорода и обратно. Введение в водные растворы различных соединений может приводить либо к катализированию, либо к ингибированию процессов генерации активных форм кислорода в воде, что связывается со структурными перестройками ассоциатов. Изменение концентрации АФК в воде в точках фазовых превращений указывает на наличие в ней примесей в виде металлов переменной валентности в том числе и урана в воде.

В работе [6] проведено исследование влияния естественных электромагнитных полей на генерацию активных форм кислорода в водных растворах металлов переменной валентности. В ходе исследований было установлено, что зависимость изменения концентрации перекиси водорода от геомагнитного фона Земли носит куполообразный характер. При этом в невозмущенной атмосфере перекись водорода нарабатывается слабо, слабовозмущенная атмосфера соответствует пиковым значениям концентрации, а при магнитных бурях концентрация $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов вновь уменьшается. В то же время возмущенное состояние атмосферы сопровождается ростом короткопериодных вариаций концентрации $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов в воде. Такой характер наработки $HO_2^{-(*)}$, по мнению авторов, свидетельствует о том, что в водной среде происходит преобразование геомагнитной энергии поля Земли в энергию АФК и перекиси водорода в воде.

Анализ концентрационной зависимости $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов в водных растворах уранила от водородного показателя [6] свидетельствуют о наличии в системе неравновесных процессов, характеризующихся фазовой нестабильностью (тонкая структура спектра). Подобные неравновесные процессы наработки $HO_2^{-(*)}$ наблюдаются и для других α-активных элементов, например для тория, которые, как и уран, относятся к металлам переменной валентности. Такой ход зависимости концентрации перекиси водорода в растворах солей урана во многом повторяет характерные спектры поглощения U(III) и U(IV) в видимом диапазоне длин волн [7], что указывает на наличие в системе фазового перехода, так как интерпретация спектров поглощения ионов урана основана на модели электронных переходов между отдельными уровнями. При сопоставлении зависимости с потенциалами переходов ионов урана авторами установлено, что генерация перекиси водорода в воде совпадает с интервалами pH перехода одной ионной формы соединения в другую. При этом максимальная наработка пергидроксильного ион-радикала в воде при наличии в ней солей урана происходит в точке фазового перехода U(III) — U(IV) при $pH = 2{,}5$:

$$UO_2^{2+} \xrightarrow{+0{,}17\text{В}} UO_2^{+}.$$

Увеличение концентрации $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов, по мнению авторов, указывает на то, что их генерация в воде в присутствии металлов переменной валентности обусловлена динамикой обменных процессов в слабых джозефсоновских структурах связанных состояний воды. Способность подобных структур к концентрированию внешней магнитной энергии позволяет создавать в них избыточный запас химической энергии в виде кислородных ион-радикальных форм. В результате обменных процессов между связанными состояниями вещества в среде при джозефсоновских контактах часть накопленной энергии диссипирует с образованием сольватированных электронов, которые обеспечивают в воде дополнительную генерацию активных

форм кислорода. Авторы показали, что переход одной ионной формы металла переменной валентности в другую вызван фазовыми превращениями в связанных состояниях воды, сопровождающимися появлением в среде дополнительных активных форм кислорода. При этом процесс генерации пергидроксильных ион-радикалов в воде имеет осциллирующий характер.

В работе [8] проводилась оценка влияния синусоидальных электромагнитных полей на генерацию активных форм кислорода в водных растворах металлов переменной валентности по содержанию пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$. В качестве источника генерации синусоидальных электромагнитных полей использовался генератор высокочастотных сигналов Г4–117. Определение содержания пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ в обработанных и необработанных электрическим полем водных растворах сульфата уранила проводилось попеременно. В ходе исследований было установлено, что наблюдаемый характер нелинейной генерации $HO_2^{-(*)}$ в воде свидетельствует о макроскопическом квантовом поведении системы, когда поведение изолированных друг от друга объемов воды подобно синхронизированным в фазе или противофазе колебаниям контура. При этом реакция среды на воздействие не только распространяется в прошедшем времени, но и имеет место до воздействия, что, на взгляд авторов, соответствует сущности вихревого электромагнитного поля как квантовомеханической системы, квантующейся в пространстве и времени.

При исследовании влияния внутренних гравитационных волн и когерентного ИК-излучения гелий-неонового лазера на генерацию активных форм кислорода в водных растворах сульфата уранила было установлено, что действие вихревых электромагнитных волн, как и внутренних гравитационных волн, подавляет генерацию активных форм кислорода в водных растворах металлов переменной валентности. На основании полученных данных по деформации спектра кинетики хемилюминесценции $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов, обрабатываемых ИК-лазерным излучением, был сделан вывод о том, что излучение ИК диапазона практически не оказывает влияние на наработку ион-радикалов, что обусловлено значительным разбалансом частот излучения и собственных колебаний поляронной системы ассоциата. Учитывая макроскопические характеристики ассоциатов, было предположено, что резонансные частоты колебания могут находиться в диапазоне КВ-частот.

Нелокальное взаимодействие электронов в воде может осуществляться посредством туннелирования куперовских электронов внешней среды в «потенциальные ямы», образуемые электрическим полем границ раздела фаз в ассоциатах. Подобный перенос может происходить преимущественно на парамагнитный кислород (O_2), растворенный в ассоциатах отрицательной полярности.

Экспериментальное исследование процессов, обусловленных нелокальным взаимодействием электронов в воде с электронами внешней среды, которое сопровождается образованием супероксидного $O_2^{-(*)}$-ион-радикала, проводилось с использованием генератора электромагнитных излучений ГШ-6.

В исследовании дистиллированная вода в кварцевых кюветах располагалась в трех вариантах: вплотную к генерирующему элементу; в 20 см ортогонально к генерирующему элементу (переотраженное КВЧ-излучение); в 1,5 м от генератора с защитой от переотраженного излучения металлическим экраном (регистрируется отраженное от стен КВЧ-излучение). Объем воды в кюветах был одинаковым и составлял 30 мл, на каждое измерение отбирались 100 мкл воды. Контроль концентрации супероксидного ион-радикала $O_2^{-(*)}$ в дистиллированной воде осуществляли по методике хемилюминесцентного анализа с использованием пероксидного реактива [9, 10]. Исходная концентрация $O_2^{-(*)}$ в воде осциллирует в диапазоне $(0{,}5–3{,}5)\cdot10^{-6}$ моль/л (рис. 1). Вода, подверженная облучению генератора ГШ-6, во всех трех вариантах расположения кювет дает резкие всплески концентрации $O_2^{-(*)}$ (рис. 2–4).

Так, в кювете, находящейся вплотную к генератору, возникают всплески генерации $O_2^{-(*)}$ в интервалы времени 15–25 мин и 75–87 мин после начала измерений, концентрация достигает $1{,}5\cdot10^{-4}$ моль/л, малоинтенсивные всплески

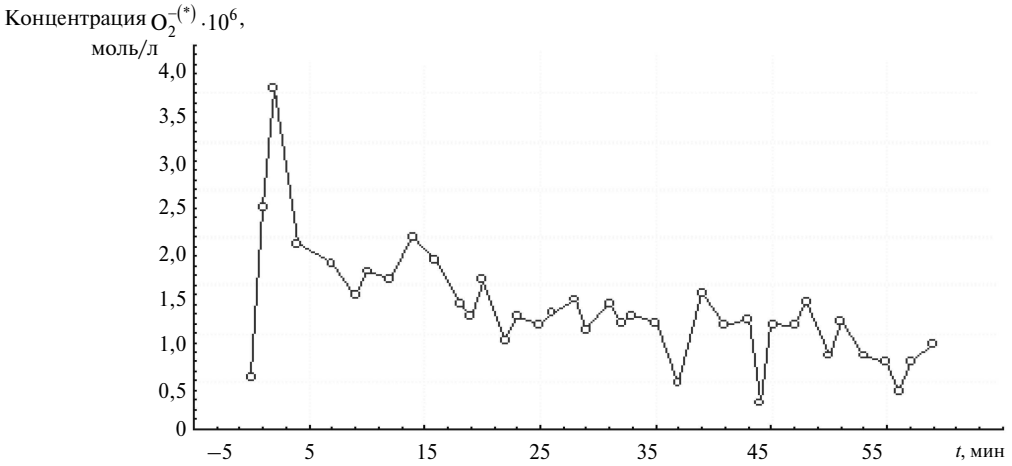


Рис. 1. Кинетика изменения концентрации $O_2^{-(*)}$ в дистиллированной прокипяченной и отстоянной воде

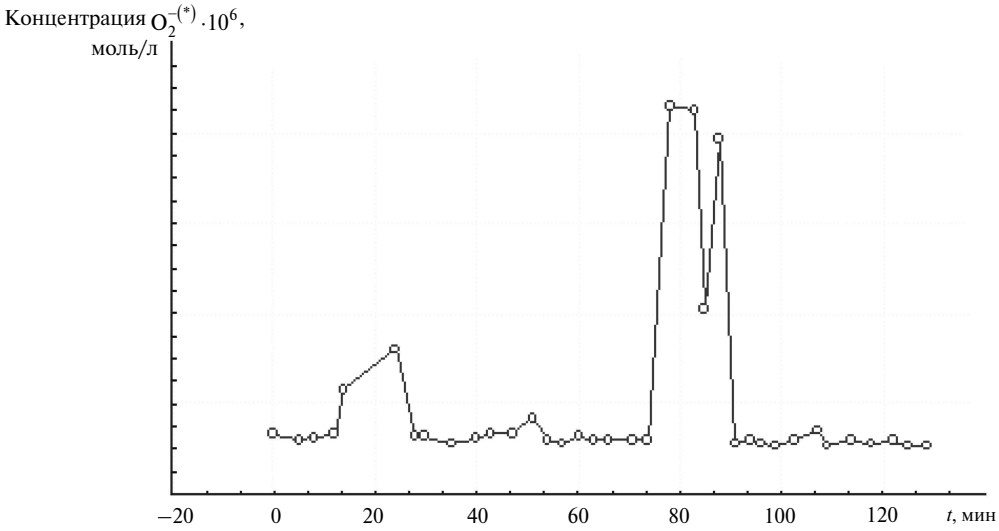


Рис. 2. Кинетическая зависимость изменения концентрации супероксидных ион-радикалов в дистиллированной прокипяченной отстоянной воде под воздействием генератора ГШ-6 (кювета кварцевая; расположение вплотную,объем воды 30 мл; начало измерений через 20 мин после включения генератора)

отмечаются на 50-й и 127-й минутах (см. рис. 2). В кювете, находящейся под действием переотраженного КВЧ-излучения, всплеск концентрации супероксидного ион-радикала достигает $4{,}5 \cdot 10^{-4}$ моль/л на 75–80 минуте, а малоинтенсивный всплеск — на 35–38-й минуте (см. рис. 3). В экранированной от переотраженного КВЧ-излучения кювете малоинтенсивный всплеск концентрации $O_2^{-(*)}$, обнаруженный на 8–12 минуте, составляет $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ моль/л (рис. 4).

В промежутках между данными импульсами заметных изменений концентрации $O_2^{-(*)}$ по сравнению с фоновыми значениями не отмечалось, хотя генератор ГШ-6 облучал кюветы непрерывно.

С учетом того, что всплески концентрации $O_2^{-(*)}$ в воде возникают в различное время, можно говорить об активации ассоциатов отрицательной полярности электромагнитным излучением КВЧ-диапазона и о нелокальном характере вза-

имодействия активированных ассоциатов, проявляющемся в «захвате» пакетов электронов из внешней среды, который сопровождается ионизацией кислорода в составе ассоциатов отрицательной полярности согласно реакции

$$\sum O_2 + \sum e^- \rightarrow \sum O_2^{-(*)},$$

где суммирование означает макроскопический характер переноса электронов.

Роль КВЧ-излучения как активатора джозефсоновской среды заключается в изменении

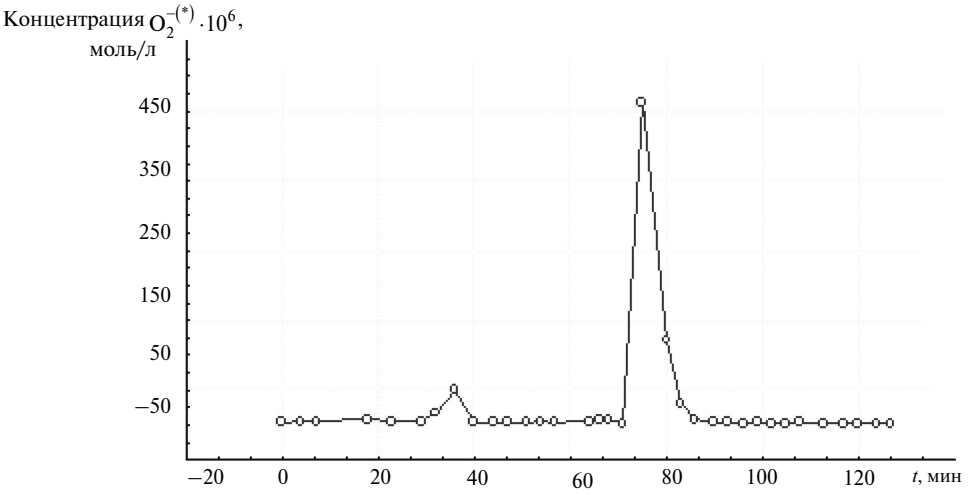


Рис. 3. Кинетическая зависимость изменения концентрации супероксидных ион-радикалов в дистиллированной прокипяченной отстоянной воде под воздействием генератора ГШ-6 (вода в 20 см от боковой поверхности генератора, кювета кварцевая, объем воды 30 мл). Измерения проводились последовательно с данными на рис. 2 с разницей в 1–1,5 мин

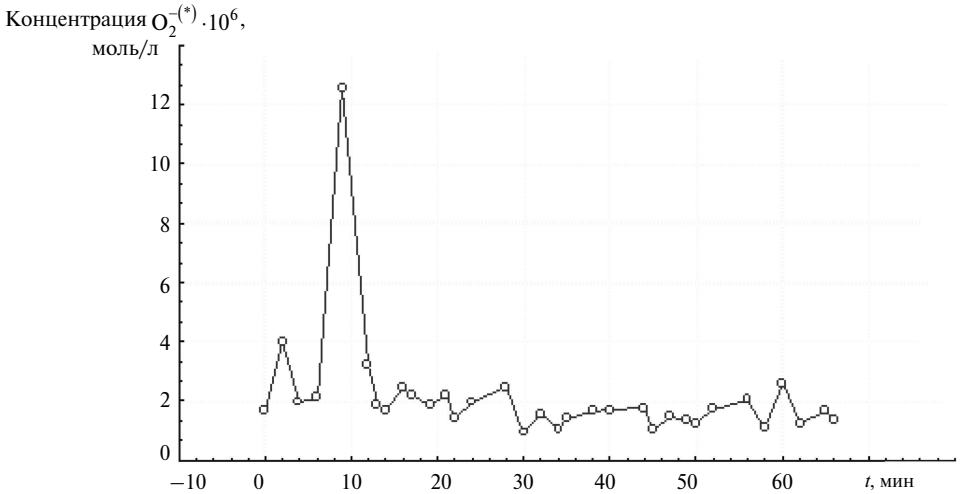


Рис. 4. Кинетическая зависимость изменения концентрации супероксидных ион-радикалов в дистиллированной прокипяченной отстоянной воде под воздействием генератора ГШ-6 (вода в 1,5 м от работающего генератора, ортогонально оси генератора; вода дополнительно экранировалась металлическим экраном; начало измерений через 20 мин после включения генератора)

магнитной энергии ассоциатов воды и связанной с этим процессом миграции зарядов.

Таким образом, преобразование рассеянной энергии в ассоциированных состояниях воды в энергию ион-радикалов осуществляется в процессах электрон-фононного и электрон-экситонного взаимодействия в сверхпроводящих структурах ассоциатов, возбуждаемых излучением в КВЧ-диапазоне, что подтверждается также данными работы [11]. Накопление геомагнитной энергии в таких структурах имеет нелокальный характер взаимодействия электронов в окружающей среде и происходит за счет квантового обмена энергией посредством электромагнитных вихрей.

С целью оценки влияния активности ионов уранила на генерацию пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ в водных растворах были проведены исследования по изучению того, как влияет изотопный состав урана и активность его раствора на содержание активных форм кислорода в водной системе. Определение изотопного состава вводимого в раствор урана и его активация проводились в Институте ядерных исследований имени И.В. Курчатова с использованием α-излучения, а измерение счетных образцов — с применением жидкостного сцинтилляционного счетчика TRI-CARB 2550 TR/AB (Canberra-Pac-card), снабженного дискриминатором альфа- и бета-импульсов и многоканальным анализатором.

Для идентификации и расчета активности изотопов использовали программу обработки спектров «Rad Spectra Dec», которая включает «сворачивание» аппаратурного спектра и сравнение его с модельным, полученным расчетным путем, с обращением к библиотеке спектров отдельных изотопов. Пример исходного спектра и его расшифровки представлен на рис. 5. Основными компонентами проб, определенными статистически достоверно при данном типе анализа, являются тритий и ^{234}U.

Определение содержания альфа-излучающих изотопов проводили на альфа-спектрометрическом комплексе фирмы Canberra. Счетный образец урана готовился электрохимическим осаждением его из раствора сульфата натрия-аммония при $pH = 2{,}2–2{,}5$ на полированные диски из нержавеющей стали, которые затем служили спектрометрическими источниками.

Диаметр осаждаемого слоя составлял 12 мм, площадь — 1,13 см^2, расчетная поверхностная плотность счетного образца по урану — порядка 12–15мкг/см^2. Следует учитывать, что реальная плотность слоя может быть несколько выше из-за возможного соосаждения титана. Измерения плотности проводились на расстоянии 14 мм от поверхности детектора с целью снижения эффекта суммирования конверсионных электронов с альфа-частицами, который проявляется в виде асимметрии правого «плеча» пика аппаратного спектра и приводит к погрешностям при аппроксимации пиков.

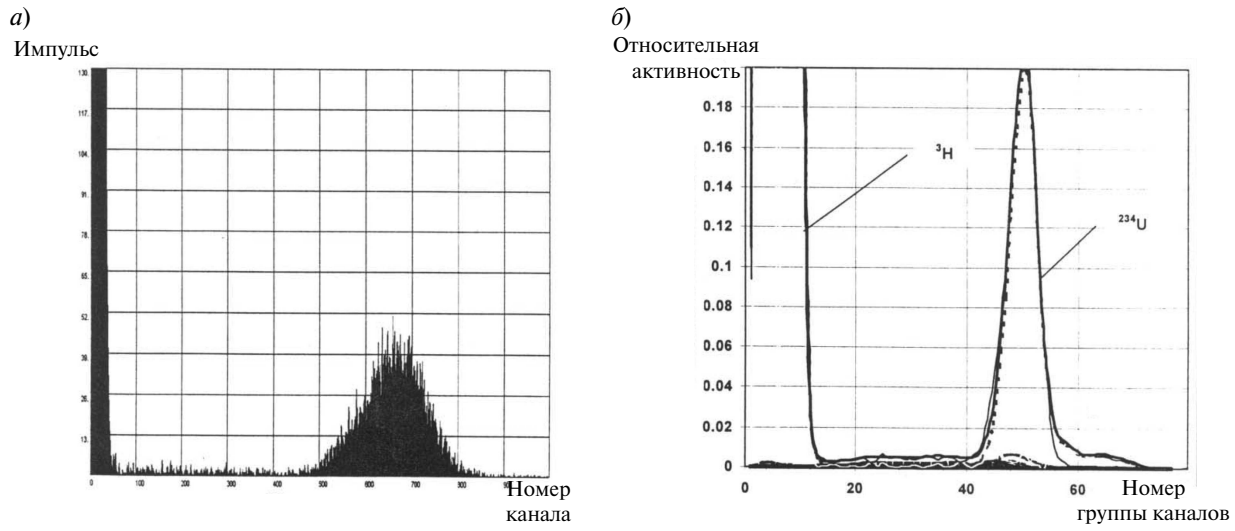


Рис. 5. Аппаратный спектр (*а*) и преобразованный в группы (*б*) при разделении на компоненты в программе «Rad Spectra Dec»

Среднее время измерения — около 150 000 с. Качество источников оценивалось по разрешению пика ^{234}U на линии 4774,6 кэВ (выход — 72,4 %). Разрешение к концу измерения составляло не менее 23,3 кэВ, при этом вклад импульсов излучения ^{234}U в низкоэнергетические изотопы ^{235}U и ^{238}U оказался менее 0,1 % и мог быть корректно учтен (рис. 6).

Изотопные соотношения рассчитывались по площади пиков. Из-за наличия у изотопа ^{235}U семи линий с заметным вкладом, которые перекрываются со всеми изотопами, присутствующими в смеси ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U, расчет проводили с использованием алгоритма, реализованного в программе «Rad Spectra Dec». Аппроксимация пиков в рамках данной программы осуществлялась сложной функцией, сочетающей асимметричный гауссиан, экспоненту и гиперболу (рис. 7). Данная функция была предложена на основании исследований спектров, полученных при измерении источников ^{210}Po с различным качеством. Площади пиков ^{234}U и ^{238}U рассчитывались суммированием по таблицам Excel с учетом вкладов соответствующих линий ^{235}U в области интегрирования данных изотопов. При этом для ^{235}U использовали расчетное значение суммы импульсов, полученное по программе «Rad Spectra Dec».

Активацию соли $UO_2SO_4 \cdot 3H_2O$ проводили потоком тепловых нейтронов ~10^{14} нейтр/см^2·с в течение двух недель в исследовательском реакторе Института ядерных исследований имени И.В. Курчатова. После активации изотопный состав урана анализировали методом

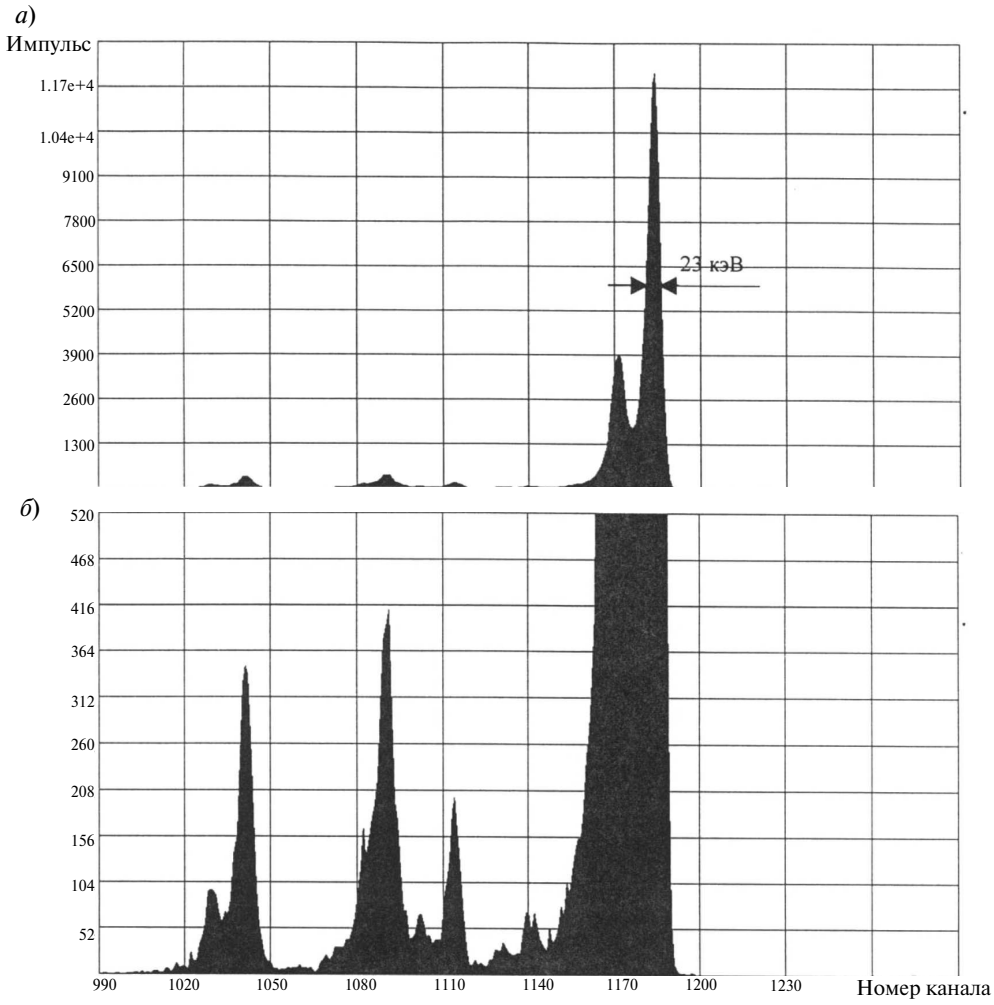


Рис. 6. Аппаратный спектр радионуклидов исследуемого образца:
а — свернутый; *б* — развернутый

жидкосцинтилляционной спектроскопии и масс-спектрометрии (табл. 1 и 2). В табл. 2 представлен изотопный состав активированного урана, определенный методом масс-спектрометрии на приборе ЭМАЛ-2, который был использован для оценки влияния активности солей урана на генерацию $HO_2^{-(*)}$ -ион-радикалов в водной среде.

В табл. 3 представлены соотношения массы изотопов в активированной соли урана к исходной массе изотопов в соли урана естественного происхождения, определенные масс-спектрометрией с использованием прибора ЭМАЛ-2. Как следует из данных, представленных в таблице, после облучения процентное соотношение ^{235}U к сумме изотопов урана в активированной соли по сравнению с необлученным образцом увеличилось почти в 30 раз (с 0,715 до 21,2 % по массе), а содержание ^{234}U возросло более, чем в 10^4 раз.

Для оценки влияния радиационного канала на наработку АФК в воде после активации UO_2SO_4 к водному раствору сульфата уранила были добавлены тритий и ^{137}Cs с удельной объемной активностью соответственно $1{,}32\cdot10^{-6}$ и $5{,}42\cdot10^{-10}$ Ки/л.

В табл. 4 представлены соотношения активностей растворов исходного сульфата уранила, активированного сульфата уранила и активированного сульфата уранила с добавлением трития и ^{137}Cs. Из данных таблицы следует, что после введения в состав уранила трития и цезия активность растворов возрастает на несколько порядков.

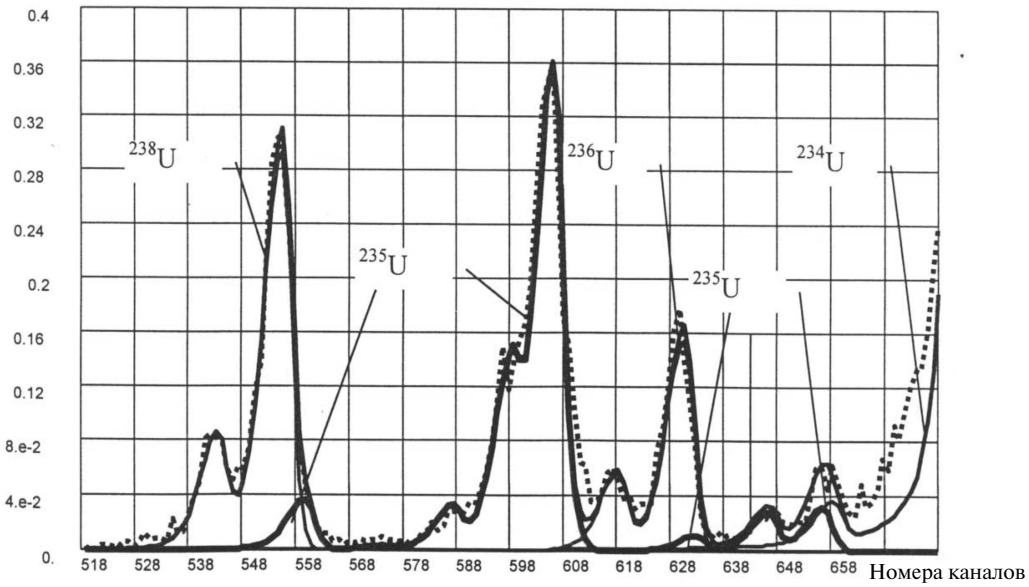


Рис. 7. Расшифрованные и свернутые в группы спектры изотопов урана с использованием алгоритма программы «Rad Spectra Dec»

Таблица 1

Изотопный состав урана естественного происхождения, определенный методом жидкосцинтилляционной спектрометрии

Изотоп	Энергия α-частиц E_α, МэВ	Период полураспада $T_{1/2}$, лет	Массовое содержание, мас. %
U-234	4,76	$2{,}48\cdot10^5$	0,005
U-235	4,58	$7{,}13\cdot10^8$	0,710
U-238	4,18	$4{,}49\cdot10^9$	99,285

Таблица 2

Изотопный состав облученного урана, определенный методом масс-спектрометрии

Изотоп	Массовое содержание, мол. %	Период полураспада $T_{1/2}$, лет
U-234	0,08	$2{,}445 \cdot 10^5$
U-235	21,81	$7{,}038 \cdot 10^8$
U-236	0,09	$2{,}3415 \cdot 10^7$
U-238	78,02	$4{,}468 \cdot 10^9$

Таблица 3

Процентное содержание изотопов урана в активированной соли

Изотоп	Процентное соотношение изотопов в уране	
	активированном	естественного происхождения
U-234/U-238	37,6	0,005
1σU-234/U-238	0,8	0,9
U-235/U-238	0,591	0,715
1σU-235/U-238	0,016	0,023
U-235/ΣU	21,2	0,71
U-238/ΣU	78,8	99,29

После приготовления неактивированного и активированного растворов сульфата уранила с одинаковой концентрацией по урану, равной $7{,}56 \cdot 10^{-4}$ моль/л, доводили до значения 2,50 водородный показатель и анализировали на хемилюминометре «ЛИК-2» в соответствии с известной методикой [9, 10].

В табл. 5 представлены данные, отражающие динамику вариации концентрации пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$, максимума хемилюминесценции (Am) и времени выхода Am (T_{Am}) водных растворов сульфата уранила. В ходе эксперимента анализировалось изменение содержания пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ во времени и характер трансформации кинетической кривой хемилюминесценции люминол-геминового реактива в присутствии анализируемого соединения. Через час после приготовления (верхняя строка табл. 5) растворы с повышенной активностью дают выход ион-радикалов на 30–50 % больший по сравнению с контрольным раствором. Однако через 24 ч ситуация меняется на противоположную — максимальные значения концентрации $HO_2^{-(*)}$ ($7{,}1 \cdot 10^{-7}$ моль/л) обнаруживаются в контрольном растворе. Это свидетельствует о том, что радиоактивность при малых активностях в приведенном выше случае подавляет синтез пергидроксильных ион-радикалов.

Характер процессов, протекающих в водном растворе соли урана (см. табл. 5) отчетливо прослеживается в изменении кинетических характеристик хемилюминесценции. Низкие значения амплитуды сигнала и высокое время выхода хемилюминесценции радиоактивных растворов свидетельствуют о доминировании высокосвязанных состояний пергидроксильных ион-радикалов по сравнению с контрольным. Подобный процесс происходит, когда в системе действует полевой фактор среды, обеспечивающий условия туннельного переноса электронов из ассоциатов воды, в результате которого слабосвязанная часть ион-радикалов преобразуется с возникновением высокореакционноспособных свободных радикалов, распадающихся через цепочку превращений до свободного кислорода.

Таблица 4

Соотношения активностей исходного и активированного раствора UO_2SO_4 с последующим добавлением изотопов трития и ^{137}Cs

Раствор	Изотоп	Объемная активность, Ки/л
Исходный раствор UO_2SO_4	^{234}U	$5{,}98\cdot10^{-10}$
	^{235}U	$2{,}71\cdot10^{-11}$
	^{238}U	$6{,}33\cdot10^{-10}$
	Суммарная активность	$1{,}26\cdot10^{-9}$
Активированный раствор UO_2SO_4	^{234}U	$9{,}01\cdot10^{-9}$
	^{235}U	$8{,}49\cdot10^{-10}$
	^{236}U	$1{,}05\cdot10^{-10}$
	^{238}U	$4{,}72\cdot10^{-10}$
	Суммарная активность	$1{,}04\cdot10^{-8}$
Активированный раствор UO_2SO_4 с добавлением изотопов ^{3}H и ^{137}Cs	^{234}U	$9{,}01\cdot10^{-9}$
	^{235}U	$8{,}49\cdot10^{-10}$
	^{236}U	$1{,}05\cdot10^{-10}$
	^{238}U	$4{,}72\cdot10^{-10}$
	^{3}H	$1{,}32\cdot10^{-6}$
	^{137}Cs	$5{,}42\cdot10^{-10}$
	Суммарная активность	$1{,}33\cdot10^{-6}$

Таблица 5

Кинетика вариации концентрации пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ ($C_{HO_2^{-(*)}}$), максимума хемилюминесценции (Am) и времени Am (T_{Am}) в водных растворах сульфата уранила

Время с начала приготовления, ч	Параметры ХЛ-реакции	Исходный раствор UO_2SO_4 (активность $A_{уд} = 1{,}26\cdot10^{-9}$ Ки/л)	Активированный раствор UO_2SO_4 (активность $A_{уд}=1{,}04\cdot10^{-8}$ Ки/л)	Активированный раствор UO_2SO_4, содержащий изотопы ^{3}H и ^{137}Cs (активность $A_{уд}=1{,}33\cdot10^{-6}$ Ки/л)
1	$C_{HO_2^{-(*)}}$, моль/л	$7{,}03\cdot10^{-7}$	$1{,}23\cdot10^{-6}$	$1{,}07\cdot10^{-6}$
	A_m, отн. ед.	254,3	51,5	57,3
	T_{Am}, с	0,2	1,03	0,56
5	$C_{HO_2^{-(*)}}$, моль/л	$9{,}43\cdot10^{-7}$	$7{,}06\cdot10^{-7}$	$6{,}17\cdot10^{-7}$
	A_m, отн. ед.	240,7	41,7	36,8
	T_{Am}, с	0,15	0,76	0,7
24	$C_{HO_2^{-(*)}}$, моль/л	$7{,}1\cdot10^{-7}$	$5{,}86\cdot10^{-7}$	$5{,}79\cdot10^{-7}$
	A_m, отн. ед.	255	41,2	35,3
	T_{Am}, с	0,17	0,7	0,83

Все изложенное свидетельствует, что радиационно-химические процессы, вызывающие генерацию ион-радикалов в водной среде, имеют кооперативный характер и связаны с электромагнитным возбуждением ион-кристаллических ассоциатов воды и их фазовой трансформацией, которая сопровождается образованием свободных радикалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Булатов, В.И.** Россия радиоактивная [Текст] / В.И. Булатов. Новосибирск: ЦЭРИС, 1996.— 271 с.

2. **Тихонов, М.Н.** Радиационная география России: системный взгляд на проблему [Текст] / М.Н. Тихонов // Сб. научных трудов Всероссийской НПК «Безопасность в чрезвычайных ситуациях». 23–24 апреля 2009 г.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009.— С. 87–95.

3. Справочник помощника санитарного врача и помощника эпидемиолога / Под ред. Д.П. Никитина, А.И. Заиченко.— М.: Медицина, 1990.— 512 с.

4. Вода — космическое явление / Под ред. Ю.А. Рахманина, В.К. Кондратова / РАЕН.— М.: Изд-во РАЕН, 2002.— С. 427.

5. **Ло, Ш.** Наноструктуры в очень разбавленных водных растворах [Текст] / Ш. Ло, В. Ли // Российский химический журнал.— 1999. Т. 43, № 5.— С. 40–48.

6. **Гуменюк, В.И.** Влияние естественных электромагнитных полей на генерацию активных форм кислорода в водных растворах уранилов [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 4 (159).— С. 210–220.

7. **Авраменко, С.В.** Потенциальные возможности монополярного холодноплазменного генератора и экология [Текст] / С.В. Авраменко // Тез. докл.— Всеросс. научная конф. «Физико-химические потери сжигания углеводородных топлив». Москва. 20–25 мая 1998 г. С. 214.

8. **Кулинкович, А.В.** Образование активных форм кислорода в водных растворах солей урана при воздействии электромагнитных полей [Текст] / А.В. Кулинкович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 2-2 (147).— С. 249–258.

9. **Гуменюк, В.И.** Хемилюминесцентный экспресс-контроль соединений урана в природных водах [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 4 (135).— С. 178–186.

10. **Гуменюк, В.И.** Анализ существующих механизмов генерации активных форм кислорода в водных растворах уранилов [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 4 (135).— С. 186–193.

11. **Ермолаев, Ю.М.** Продольные электромагнитные волны: теория, эксперименты, перспективы применения [Текст] / Ю.М. Ермолаев, Б.Н. Родионов.— М., 2003.— 171 с.

КУЛИНКОВИЧ Алексей Викторович — *кандидат химических наук, докторант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 248-91-93
geochem@mail.ru

ГУМЕНЮК Василий Иванович — *доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 248-91-93
kaf-uzchs@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 543.426:539.16.04:556.53

Ю.Ю. Кулинкович, О.В. Гуменюк

ФАКТОРЫ И МЕХАНИЗМЫ МАССОВОЙ ПАНИКИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

J.J. Kulinkovich, O.V. Gumenyuk

FACTORS AND MECHANISMS OF MASS PANIC IN EMERGENCIES

Рассмотрены вопросы поведения человека в условиях чрезвычайных ситуаций и влияние индивидуальной паники на окружающих (толпу). Выделены факторы возникновения массовой паники и механизмы ее развития. Меры по предотвращению и приемы ликвидации паники в чрезвычайных ситуациях строятся с учетом указанных факторов и механизмов.

СТРАХ. ПАНИКА. ПАНИЧЕСКАЯ ТОЛПА. МАССОВАЯ ПАНИКА. ФАКТОРЫ ПАНИКИ. МЕХАНИЗМЫ МАССОВОЙ ПАНИКИ. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ.

Questions of behavior of the person in the conditions of emergency situations and influence of an individual panic on surrounding (crowd) are considered. Factors of emergence of a mass panic and mechanisms of its development are allocated. Measures for prevention and receptions of elimination of a panic in emergency situations are under construction taking into account the specified factors and mechanisms.

FEAR. PANIC. PANIC CROWD. MASS PANIC. PANIC FACTORS. MECHANISMS OF A MASS PANIC. SCHEDULED MAINTENANCE.

В критический момент люди, не оказавшиеся на высоте положения, превращают опасность в катастрофу. Опасность заключается в них самих.

Д. Ллойд-Джордж

Вопросы психологии человека в чрезвычайных ситуациях (ЧС) необходимо рассматривать в целях подготовки населения, спасателей, руководителей к действиям в экстремальных ситуациях.

При рассмотрении вопросов поведения человека в условиях ЧС большое внимание уделяется психологии страха. В повседневной жизни, в экстремальных условиях человеку постоянно приходится преодолевать опасности, угрожающие его существованию, что вызывает (порождает) страх, т. е. кратковременный или длительный эмоциональный процесс, порождаемый действительной или мнимой опасностью. Страх вызывает у человека неприятные ощущения (негативное действие страха), но страх — это и сигнал, команда к индивидуальной или коллективной защите, так как главная цель, стоящая перед человеком, — остаться живым, продлить свое существование.

Страх, как отмечают многие психологи [1–3], является отпечатком современного мира, в котором живет человечество. Человек находится в состоянии постоянной тревоги, страх подстерегает его повсюду. Человек, поддающийся сильному воздействию страха, нередко теряет

контроль над собой, не принимает мер самозащиты, плохо ориентируется в обстановке и может подвергнуться панике, если страх переходит в стресс. Когда человек начинает чего-то бояться, то именно это с ним, как правило, и происходит. Страх до определенного времени и предела может считаться физиологически нормальным и даже полезным явлением, ибо способствует экстренной мобилизации физического и психического напряжения, что необходимо для самосохранения. Он выступает в роли защитного механизма, спасающего нас от преждевременной смерти. «Бесстрашных» психически нормальных людей не бывает. Если человек не реагирует на опасность, то это значит, что он страдает психическим нездоровьем. Следовательно, страх — нормальная защитная реакция на ненормальные, чрезвычайные обстоятельства. Все дело во времени, которое требуется для преодоления чувства страха, сопровождающегося растерянностью и неорганизованностью поведения. У человека, подготовленного к действиям в чрезвычайной ситуации, это происходит значительно быстрее, чем у неподготовленного, у которого сохраняется длительное бездействие, суетливость, стимулирующие развитие психических расстройств. Если человек контролирует свой страх, значит, он осознает опасность и пытается избежать ее. В этом случае всегда найдется выход из сложной ситуации.

Паника — это бесконтрольный страх. Она психологически характеризуется состоянием массового страха перед реальной или воображаемой опасностью, нарастающего в процессе взаимного «заражения» людей и блокирующего способность рациональной оценки обстановки, мобилизацию волевых ресурсов и организацию совместного противостояния возникшей обстановке.

Почему нормальный человек в толпе целиком подчиняется ее настроению? Любая объединяющая цель — созидательная или разрушительная — ведет к возникновению единого мощного энергетического поля. Настроение толпы изменяет настроение индивидуума и дает эмоциям возобладать над здравым смыслом [4].

Толпа — во многом лишенная структуры большая группа людей, объединенная между собой эмоциональным настроем или предметом внимания, но при этом, как правило, не объединенных четко осознаваемыми общими намерениями и планами, а тем более, единой целью и отчетливыми представлениями, каким образом она может быть достигнута.

Паническая толпа — это подвид действующей толпы (наряду с другими подвидами — агрессивной, стяжательной и повстанческой). Опыт показывает, что она — самая опасная из всех разновидностей толпы. По количеству непосредственных человеческих жертв массовая паника способна далеко превосходить, например, агрессивную толпу, но и по отдаленным последствиям ей не уступает.

Слово «паника» происходит от имени Пана, греческого бога пастухов. Пастухи часто становились свидетелями того, как вследствие самой незначительной причины, особенно ночью, стада овец или коз, полностью выйдя из-под контроля, бросались в воду, в огонь, как животные одно за другим прыгали в пропасть [3].

Вот как описал подобные явления знаменитый биолог А.Э. Брем [1]: «Каждый подозрительный шорох заставляет насторожиться все стадо. Молния, гром, ураган, плохая погода лишают его возможности нормального поведения; обезумевшее стадо разбегается по степи, овцы попадают в воду, в огонь или же совершенно неподвижно застывают на одном месте. В это время их заносит снегом, заливает дождем, они замерзают, гибнут от голода, но не делают никаких попыток укрыться или найти пищу. Так бессмысленно погибают не одно и не два, а тысячи животных».

Пастухи объясняли это демоническое явление гневом Пана, во всех изображениях которого, даже в живописи Нового времени (М.А. Врубель и др.), присутствуют черты, вызывающие страх.

В последующем «полномочия» Пана значительно расширялись: он сделался богом войны, которому поклонялась вся Греция. Логическая связь между мирной работой пастуха и военным делом кажется странной, если не вспомнить об особенностях тогдашних сражений по сравнению с войнами Нового времени.

Развитие техники обеспечило возможность организованного отступления, когда между отступающими подразделениями и неприяте-

лем сохраняется дистанция и отход с поля боя (с переходом на запасные позиции и т. д.) не обязательно является беспорядочным. В древности же, как указывают военные историки, воины сражались «на расстоянии копья и кинжала». Обычно это завершалось тем, что одна из сторон, не выдержав натиска, бросалась в ужасе бежать, преследуемая и добиваемая торжествующим противником [4].

Итак, этимологически термин «паника» предполагает массовый характер явления. Однако в современных языках корень слова улавливается слабо, и, во всяком случае в психологии, принято различать массовую и индивидуальную панику.

Кроме того, массовая паника не обязательно выливается в форму собственно панической толпы. Она может выразиться чувством обреченности и парализацией воли, когда масса людей становится неспособна к решительным действиям в критической ситуации, отказывается от поиска самостоятельных решений [5].

С одной стороны, паника может возникнуть безо всякой внешней опасности и в подавляющем большинстве случаев оказывается несоизмерима ей. С другой стороны, никакая внешняя опасность сама по себе недостаточна для возникновения паники. «Даже тогда, когда паника вызывалась беспредельно большой опасностью, — писал А.С. Прангишвили, — психологическая природа переживания ужаса принципиально такова, как и в момент возникновения ее из-за незначительной причины (однако в последнем случае эти особенности даны более выраженно), поскольку в конце концов всякая реальная и большая опасность может быть пережита и без паники. Так что, сильный ужас, связанный с паникой, и в случае реальной опасности может считаться вторичным явлением» [1, 6].

Итак, в самом общем плане можно дать следующее определение: паника — состояние ужаса, сопровождающееся резким ослаблением волевого самоконтроля.

Следствием оказывается либо ступор, либо то, что Э. Кречмер называл «вихрем движения», «гипобулической реакцией», т. е. дезорганизацией плановых действий. Поведение во внутренне конфликтной ситуации становятся антиволевым: эволюционно примитивные потребности, прямо или косвенно связанные с физическим самосохранением, подавляют потребности, связанные с личной самооценкой. Приведенное определение охватывает все формы коллективной и индивидуальной паники.

Удалось выявить четыре комплекса факторов (иначе их называют условиями, или предпосылками) превращения более или менее организованной группы в паническую толпу [2, 7].

1. Социальные факторы — напряженность в обществе, вызванная происшедшими или ожидаемыми природными, экономическими, политическими бедствиями. Это могут быть землетрясение, наводнение, эпидемия, реальная или мнимая нехватка продовольствия, резкое изменение валютного курса, государственный переворот, начало или неудачный ход войны и т. д. Иногда напряженность обусловлена памятью о трагедии и(или) предчувствием надвигающейся трагедии, приближение которой ощущается по каким-либо признакам.

2. Физиологические факторы — усталость, голод, длительная бессонница, алкогольное и наркотическое опьянение. Они снижают уровень индивидуального самоконтроля, что при массовом скоплении людей чревато особенно опасными последствиями.

3. Общепсихологические факторы — неожиданность, удивление, испуг, вызванные недостатком информации о возможных опасностях и способах противодействия.

4. Социально-психологические и идеологические факторы — отсутствие ясной и высокозначимой общей цели, эффективных, пользующихся общим доверием лидеров и, соответственно, низкий уровень групповой сплоченности.

Структура и динамика человеческих потребностей таковы, что люди могут, потеряв волю и достоинство, впасть в животное состояние. И те же люди при появлении высокозначимых целей способны в буквальном смысле стоять насмерть, ложиться под танки и бросаться в огонь. При этом внешняя оценка их поступков в экстремальных ситуации — героических, преступных или просто глупых — сильно зависит от того, насколько собственные ценности наблюдающего согласуются с ценностными координатами наблюдаемого поступка.

Меры по предупреждению массовой паники связаны с учетом ее предпосылок (факторов). Если речь идет о сформировавшейся группе, нацеленной на работу в стрессовых ситуациях (в частности, отряд спасателей МЧС), то прежде всего следует уделять внимание идейной и организационной подготовке к возможным опасностям, обеспечению эффективного руководства и воспитанию лидеров, пользующихся высоким доверием. В свою очередь, при отсутствии духовно-психологических предпосылок паники коллектив способен достойно встретить самые суровые испытания [8].

Но не всегда такая подготовка в принципе возможна, например при массовых уличных мероприятиях, где участвует множество более или менее случайных людей. В таких ситуациях особое значение приобретает учет физиологических и общепсихологических факторов.

Ранее указывалось на типичные ошибки, состоящие в затягивании мероприятий и безразличии к физическому состоянию участников (усталость, опьянение и т. д.).

Чрезмерно важен учет общепсихологического фактора паники: прежде всего, необходимо своевременно информировать людей о возможных опасностях и имеющихся способах противодействий. Последнее касается предупреждения как коллективной, так и индивидуальной паники.

Необходимо проводить разностороннюю профилактическую работу [2–4]:

Анализ особенностей возникновения и течения различных форм индивидуальных и коллективных реакций страха (паники) — основа профилактики любых психологических явлений

2. Профотбор лиц для работы на опасных видах труда и особенно руководителей производственных коллективов (существуют личности с повышенным уровнем риска). Накопленный опыт изучения катастрофических ситуаций позволяет утверждать, что имеются лица, склонные (в силу своей психопатии, нервности) к созданию несчастных случаев и к неадекватным действиям в угрожающей ситуации.

3. Обучение приемам обеспечения безопасности и воспитательная работа по формированию в сознании людей осторожности и разумному поведению в аварийных и чрезвычайных ситуациях, по предупреждению таких ситуаций. Человек, работающий на опасных производствах должен:

знать свои обязанности по профилактике ЧС и нести ответственность не только за возникновение несчастных случаев, но и за характер своих действий при руководстве массами (при пожарах и других ЧС);

иметь психологическую готовность к действиям в ЧС, сознавать, что взрыв, пожар или другие явления — это реальная опасность, быть готовым не только к профилактике или остановке катастрофического процесса, но и к руководству массами людей;

знать графики работы смен и схемы действий в критических ситуациях;

участвовать не только в деловых, но и в аварийных играх, что способствует познанию проблемы и формированию автоматизма действий в ЧС.

4. Информационными средствами и примером действий окружающих лиц доводить до людей, что основной задачей в ЧС и во время катастрофы является сохранение спокойствия и быстрая разумная деятельность. Люди должны знать и понимать, что народ в условиях давки гибнет.

5. Основа профилактики паники — умелое руководство массой людей. Паническая реакция — это всегда индукция страха, утрата степени сознательного руководства и случайный захват «руководства» действиями людей лицами, находящимися в состоянии страха и действующими бессознательно, автоматически. Эти лица яркостью поступков и речи (крики) возбуждают окружающих и фактически увлекают за собой других, которые находятся в связи со страхом в состоянии суженного сознания и действуют автоматически без оценки сложившейся ситуации. В состоянии страха люди легко поддаются управлению и могут быть переведены в условия безопасной и объективной деятельности. Если руководство массой осуществляется сознательной личностью, то люди сохраняют способность разумных действий и защиты своей жизни.

5. Особую роль в профилактике страха играет деловая занятость (должность) человека и демонстрация организованности действий окружающих лиц. «Действие спасает от страха. Оно спасает и от страха, и от слабостей, даже от хо-

лода и болезней» (Антуан де Сент-Экзюпери). Так, солдаты, привлеченные спасать детей при повторных толчках землетрясения, не испытывали страха, в отличие от ничем не занятых людей (Ленинакан).

6. В острой ситуации или угрожающей обстановке необходимо убирать (фиксировать) людей, способных индуцировать страх и вовлечь людей в опасную деятельность. Их влияние на окружающих должно быть приостановлено, так как может произойти индукция (передача) их действий массе людей.

7. В структуре руководства массой людей большую роль играет система оповещения: громкоговорящее оповещение, световые и звуковые сигналы, указатели выходов, направления движения и другие средства.

О зависимости между эмоцией и информацией философами, психологами и биологами написаны тома, и эта проблема заслуживает особого разговора.

Эмоциональное состояние и поведение человека при опасности в огромной степени определяются образом ситуации и, главное, представлением о своей роли в ней. Паника может возникнуть тогда, когда ситуация для человека необычна и неожиданна, неизвестны способы преодоления опасности, отсутствует план действий и индивидуум является пассивным объектом событий. Но при наличии знания (сколь бы иллюзорно оно ни было) и программы действий (пусть и неадекватной) человек чувствует себя активным субъектом — и психологическая ситуация решительно меняется. Образуется другая доминанта, внимание переключается со страха и боли на предметную задачу; в итоге же страх уходит совсем, а болевой порог значительно повышается [8].

Обсуждая способы ликвидации возникшей паники, полезно вспомнить о том, что ранее говорилось про психологический момент. Известны приемы возвращения момента, наиболее подходящего для начала эффективного руководства.

Например, используется привычное стимулирование. Люди привыкли неподвижно застывать при исполнении национального гимна, и этот условный рефлекс может актуализироваться при громком включении первых же тактов.

Другой прием — вариант того, который хорошо известен врачам и особенно психотерапевтам, сталкивающимся с приступами истерии. Приступ может быть купирован резким внезапным событием: пощечиной, неожиданным громким звуком и т. д. Говорят, один психиатр использовал для этого очень правдоподобный муляж извивающейся змеи, которая неожиданно появлялась в его руке.

Сильное шоковое воздействие оказывается эффективным и при массовой панике. Например, выстрел в закрытом помещении способен произвести новую «оторопь», люди на секунду застывают — и становятся доступны для организационных мер.

Исследование людей, спасшихся в Уфимской катастрофе (взрыв газа и гибель двух пассажирских поездов), показало, что для них характерной была психогенная анестезия (не чувствовали боли) в течение первых 5–10 минут после взрыва, получения травм и ожогов, причем с сохранением ясного сознания и способности к рациональной деятельности (поэтому они и смогли спастись). У лиц с повышенным чувством ответственности (у должностных лиц поездной бригады) длительность психогенной анестезии в отдельных случаях достигла 15 минут, даже при общей площади ожоговых поражений до 40 % поверхности тела. Одновременно отмечалась значительная мобилизация (сверхмобилизация) психофизиологических резервов и физических сил: некоторые пострадавшие выбирались из перевернутых вагонов с заклинившимися выходами из купе, в прямом смысле раздирая руками перегородки крыши. Сразу после того, как пострадавшие покинули вагоны, они организовывались в небольшие (10–15 человек) группы, где стихийно выделялся свой лидер, который придавал целенаправленность действиям остальных людей для спасения своих жизней и взаимной помощи [3, 9].

Гипермобилизация в начальный период присуща практически всем людям, однако, если она сочетается с состоянием паники, то может и не привести к спасению человека, так как происходит потеря ориентации, нарушение соотношения между основными и второстепенными действиями, обострение оборонительной реакции, отказ от деятельности или гибель. Люди, спас-

шиеся в экстремальной ситуации, долгое время испытывают те или иные патологические изменения в психической сфере (посттравматический синдром). Среди психопатологических изменений после травм, аварий у людей чаще всего встречаются депрессивные состояния — 56 %, психогенный ступор — 23 %, общее психомоторное возбуждение — 11 %, бредо-галлюцинарные состояния — 5 %, неадекватность, эйфория — 3 %, ночные кошмары во сне — 90 %, раздражительность, чувство вины, потеря желания жить. Для снятия указанных психологических нарушений требуется специальная психотерапевтическая помощь психологов и психотерапевтов. Обследование членов аварийно-спасательных команд показало, что они также испытывают существенные изменения в психическом состоянии после работы в зоне бедствий: 98 % испытывают страх и ужас от увиденного, в 20 % случаев собственное состояние (по прибытии на место Уфимской катастрофы) характеризовалось как предобморочное, головные боли, тошнота, рвота. У 50 % спасателей в последующие дни после прекращения спасательных работ сохранялись психические нарушения: кошмарные сновидения, бессонница, сонливость днем, подавленное настроение, повышенная раздражительность [1].

Для спасательных работ необходимо отбирать людей с высокой эмоциональной устойчивостью. В противном случае 20–30 % спасателей сами попадают в психологически шоковое состояние и не могут выполнять спасательные работы.

Подводя итог изложенному, отметим, что необходимо следующее:

проведение профилактических и охранных мероприятий;

эргономическая оптимизация оборудования, рабочего места, информационной нагрузки;

профотбор и отсев профессионально непригодных лиц;

устранение несоответствия структуры деятельности психофизиологическому состоянию человека за счет профилактики зрительных и психоэмоциональных перенапряжений, переутомлений, монотонии;

совершенствование структуры личности работников за счет повышения профессиональной компетентности и опыта, эмоциональной устойчивости и способности к самоуправлению и саморегуляции, ответственности, дисциплинированности, готовности выполнять требования безопасности труда, тренировки внимания, памяти, мышления и пр.

Надо помнить, что паника — это состояние ужаса, сопровождающееся резким ослаблением волевого самоконтроля. При массовой панике особую роль играют механизмы, связанные с эмоциональным окружением.

Меры по предотвращению и приемы ликвидации паники в чрезвычайных ситуациях строятся с учетом вызывающих ее факторов и механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Назаретян, А.П.** Психология стихийного массового поведения: Толпа, слухи, политические и рекламные кампании [Текст] / А.П. Назаретян.— М.: Академия, 2005.

2. **Бехтерев, В.М.** Роль внушения в общественной жизни [Текст] / В.М. Бехтерев // В кн.: Бехтерев В.М. Гипноз. Внушение. Телепатия.— М., 1994.

3. **Назаретян, А.П.** Цивилизационные кризисы в контексте Универсальной истории: Синергетика — психология — прогнозирование [Текст] / А.П. Назаретян.— М., 2004.

4. **Гаврилец, И.Г.** Психофизиология человека в экстремальных ситуациях [Текст] / И.Г. Гаврилец.— Киев, 2006.

5. **Александровский, Ю.А.** Психогении в экстремальных ситуациях [Текст] / Ю.А. Александровский, Лобастое О.С. [и др.].— М., 1991.

6. **Молярко, В.А.** Особенности проявления паники в условиях экологического бедствия [Текст] / В.А. Молярко // Психологический журнал. 1992.

7. **Смирнов А.** Защита населения от чрезвычайных ситуаций [Текст] / Смирнов А. // ОБЖ.— 2006, № 11

8. **Белов, С.В.** Безопасность жизнедеятельности [Текст]: Учебник / С.В. Белов, А.Ф. Ильченко.— М.: Высшая школа, 2000.

9. **Фролова, М.П.** Основы безопасности жизнедеятельности [Текст]: Учебник / М.П. Фролова.— М.: Астрель, 2002.

КУЛИНКОВИЧ Юлия Юрьевна — *педагог ГБОУ СПО колледжа туризма и гостиничного сервиса.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 248-91-93
geochem@mail.ru

ГУМЕНЮК Оксана Васильевна — *старший преподаватель кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 248-91-93
geochem@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 217.21.36

В.С. Добровольский, К.А. Дубаренко

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ И ЗАЩИТЫ ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ОБЪЕКТОВ ЭКОНОМИКИ

V.S. Dobrovolsky, K.A. Dubarenko

PROBLEMS SECURITY AND PROTECTION IN EMERGENCY SITUATIONS OF ECONOMIC FACILITIES

В статье проанализированы основные проблемы, опасности и угрозы современного периода развития страны, отмеченные в Стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года и других официальных документах, их влияние на безопасность объектов экономики и обеспечение национальной безопасности РФ. Приведены характеристики территорий федеральных округов, состояния основных производственных фондов, являющиеся объективными показателями формирования опасностей и угроз природного и техногенного характера, а также общие параметры и динамика различных видов чрезвычайных ситуаций в РФ за последние 10 лет. Сформулирован реализуемый в РФ системный подход к решению проблем обеспечения безопасности объектов экономики, предусматривающий создание на всех уровнях административного устройства страны систем гражданской обороны и единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС). Проведен анализ состава и состояния объектового уровня пирамидальной структуры указанных систем, определены особенности и проблемы формирования и обеспечения эффективного функционирования на этом уровне объектовых звеньев гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций.

ОПАСНОСТЬ. БЕЗОПАСНОСТЬ. НАЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. УГРОЗА. ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ. ОБЪЕКТ ЭКОНОМИКИ. ОСНОВНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФОНДЫ. ГРАЖДАНСКАЯ ОБОРОНА. ЕДИНАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ (РСЧС). ОПАСНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ.

Современный период социально-экономического развития России характеризуется расширением спектра опасностей и угроз во всех сферах жизнедеятельности личности, общества и государства.

В Стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года отмечается, что «...несостоятельность существующей глобальной и региональной архитектуры, ориентированной, особенно в Евро-Атлантическом регионе, только на Организацию Североатлантического договора, а также несовершенство правовых инструментов и механизмов все больше создают угрозу обеспечению международной безопасности, возрастанию уязвимости всех членов международного сообщества перед лицом новых вызовов и угроз» [1].

В результате проведенных исследований установлено, что одна из фундаментальных проблем обеспечения национальной безопасности Российской Федерации связана с неуклонным возрастанием военной опасности вследствие [2, 14, 17]:

реализации политики ряда ведущих зарубежных стран, направленной на достижение преобладающего превосходства в военной сфере, распространения ими практики односторонних силовых подходов в международных отношениях;

нарушения сложившегося баланса сил в связи с усилением и приближением НАТО к границам Российской Федерации, включением в сферу его действия всей территории земного шара;

размещения в Европе элементов глобальной системы противоракетной обороны Соединенных Штатов Америки;

распространения оружия массового уничтожения и возможности его попадания в руки террористов;

дестабилизации обстановки в Ираке и Афганистане, конфликтов на Ближнем и Среднем Востоке, в ряде стран Южной Азии и Африки, на Корейском полуострове;

территориальных притязаний ряда сопредельных государств к Российской Федерации;

наличия очагов вооруженных конфликтов, прежде всего вблизи государственной границы Российской Федерации и границ ее союзников;

возможности создания крупных группировок иностранных войск непосредственно вблизи государственных границ Российской Федерации;

резкого расширением масштабов международного терроризма и его дестабилизирующего влияния на внутреннюю политическую обстановку в стране и ряде сопредельных государств;

наличия значительных запасов обычных вооружений, военной техники и средств массового поражения;

развития высокоточных, информационных и других высокотехнологичных средств ведения вооруженной борьбы, стратегических вооружений в неядерном оснащении, новых видов оружия — лазерного, пучкового, импульсного электромагнитного, СВЧ и инфразвукового, биологического, психотропного, этнического и др.

Нарастание военной опасности обусловливает объективную потребность в реализации государственной политики, предполагающей следующие направления:

осуществление стратегического сдерживания в интересах обеспечения военной безопасности страны;

предотвращение глобальных и региональных войн и конфликтов;

усиление национальной обороны за счет проведения перспективной военно-технической политики и развития военной инфраструктуры, совершенствования системы управления военной организацией государства и реализации комплекса мер по повышению престижа военной службы;

выработка и реализация комплекса оптимальных и эффективных мероприятий по повышению устойчивости функционирования объектов экономики в условиях возникновения войн и военных конфликтов.

Анализ и обобщение положений Стратегии национальной безопасности РФ до 2020 года и других документов [1, 17–19] показали, что наличие и усиление военных угроз дополняется широким спектром других опасностей и угроз современного мира, к которым могут быть отнесены:

усиление глобального информационного противоборства;

активизация различных форм противоправной деятельности в кибернетической и биологической областях, в сфере высоких технологий;

развитие националистических настроений, ксенофобии, сепаратизма и насильственного экстремизма, в том числе под лозунгами религиозного радикализма;

нарастание проблем в окружающей природной среде. Ежегодно в атмосферу выбрасывается около 145 млн т двуокиси серы, 250 млн т пыли и т. д. За последнее столетие концентрация двуокиси углерода в атмосфере повысилась примерно на 15 %, а к середине XXI века может удвоиться, стать одной из причин «парникового» эффекта, вызвать таяние снегов, ледников и затопление значительной части суши;

обострение мировой демографической ситуации, связанное с растущей ускоренными темпами численностью населения Земли (только за один XX век она возросла в 6 раз и к 2000 году составила около 6 млрд человек, а к 2025 году может достичь 12 млрд);

возрастание угроз, связанных с неконтролируемой и незаконной миграцией, наркоторговлей и торговлей людьми, другими формами транснациональной организованной преступности;

распространение эпидемий, вызываемых новыми, неизвестными ранее вирусами;

возрастающие стремления режиссеров политической глобализации к обладанию источниками энергоресурсов, в том числе на Ближнем Востоке, на шельфе Баренцева моря и в других районах Арктики, в бассейне Каспийского моря, в Центральной Азии;

последствия мировых финансово-экономических кризисов, сопоставимые по совокупному ущербу с масштабным применением военной силы.

Усиление указанных угроз — одна из актуальнейших проблем обеспечения не только национальной безопасности Российской Федерации, но и безопасности всей совокупности расположенных на ее территории объектов эко-

номики, что требует формирования и реализации четко выверенной государственной политики, направленной на минимизацию их негативного влияния на социально-экономическое развитие страны.

Серьезнейшая проблема для осуществления текущих и перспективных планов социально-экономического развития и национальной безопасности страны связана с возрастанием опасностей и угроз природного, техногенного и биолого-социального характера, являющихся источниками ежегодного возникновения многочисленных чрезвычайных ситуаций.

Выполненные исследования показывают, что появлению и усилению указанных угроз в значительной степени способствуют неблагоприятные физико-географические и социально-экономические условия нашей страны, на территории которой отмечается более тридцати опасных природных явлений (общая площадь зон повышенного риска охватывает более 45 % всей территории России, в них проживает более 50 % населения страны, в т. ч. в зонах повышенной сейсмической опасности и потенциального затопления — более 30 млн чел.). На территории России, в т. ч. и в зонах повышенного риска, эксплуатируется более 45 тысяч радиационно-, химически-, биологически, взрыво- и пожароопасных объектов, более 217 тыс. км трубопроводного транспорта, более 30 тысяч гидротехнических сооружений (водохранилища, накопители промышленных стоков и отходов) [2, 4, 5, 14, 17].

Характеристика территорий федеральных округов Российской Федерации приведена в таблице [4, 5].

Установлено также, что негативное влияние указанных объективных факторов еще более усиливается вследствие физического износа и старения основных производственных фондов объектов экономики (предприятия и учреждения производственного или социального назначения) [6]. В исследованиях отмечается, что более 60–65 % основных производственных

Характеристика территорий Российской Федерации

Характеристики территорий (федеральных округов)	Показатели для ряда территорий (федеральных округов)						
	Северо-Западный	Центральный	Южный	Приволжский	Уральский	Сибирский	Дальневосточный
Общая площадь территории, тыс. кв. км	1677,9	650,7	589,2	1038,0	1788,9	5114,2	6215,9
Численность населения, тыс. чел.	14147	36241	21401	31440	12469	20411	6988
Средняя плотность населения, чел./кв. км	8,4	55,7	36,3	30,3	7,2	4,1	1,1
Общее количество радиационно опасных объектов	13	40	4	10	6	3	5
Общее количество химически опасных объектов	390	800	700	460	350	384	440
Общее количество взрывопожароопасных объектов	2350	Более 1000	1400	Более 500	Более 800	Более 800	Более 600
Площадь зон повышенного риска чрезвычайных ситуаций (в % от общей территории округа)	17–25	20–27	11–12	11–15	4–5	40–45	37–40
Доля населения, проживающего в зонах повышенного риска чрезвычайных ситуаций (в % от общей численности населения округа)	55	51	49	47	35	41	56
Среднегодовое количество чрезвычайных ситуаций за последние 5 лет	14	15,6	16	17	22	168	19,8

фондов объектов экономики выработали технический ресурс и установленные сроки эксплуатации и обладают, вследствие этого, низкой технической надежностью, создавая предпосылки к возникновению техногенных аварий и катастроф. В то же время по группе БРИКС уровень износа основных производственных фондов не превышает 35 % [2–5].

Учитывая все изложенное, в качестве прогноза можно предполагать, что в перспективном плане сохранится общая тенденция к усилению опасностей и угроз техногенного характера, а связанная с ними техногенная аварийность будет возрастать, т. к. для их предотвращения необходимо проведение капитального ремонта и агрегатной замены всех изношенных и выработавших сроки эксплуатации материальных компонентов основных производственных фондов, инженерных сетей и иных систем жизнеобеспечения. Но в обозримой и отдаленной перспективе это не представляется возможным по объемам затрат времени, людских и материальных ресурсов.

На данном основании приведенная в Государственном докладе «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2011 году» [7] официальная статистика и динамика чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации за период 2003–2011 годы (рис. 1), имеющая общую тенденцию к устойчивому снижению их количества, в том числе и по техногенной аварийности, — достаточно дискуссионна. Например, отмеченное в указанном документе количество чрезвычайных ситуаций техногенного характера за 2005 и 2006 годы (соответственно 390 и 440) не согласуется с их количеством, приведенным в аналогичных докладах за указанные годы (2005 год — 2464, 2006 год — 2541).

Учитывая при анализе указанных документов в качестве причины такой несогласованности в статистике и динамике чрезвычайных ситуаций возможные объективные обстоятельства (например, изменение параметров учета и др.), отметим лишь, что, несмотря на ежегодную устойчивую тенденцию к снижению общей численности чрезвычайных ситуаций, в том числе техногенного характера, их количество продолжает оставаться большим, а причиняемый ущерб жизни и здоровью населения, территориям и находящимся на них объектам производственного, социального и иного назначения остается неприемлемым. Все это в соответствии с [1] представляет реальную угрозу не только жизнедеятельности населения, но и национальной безопасности Российской Федерации.

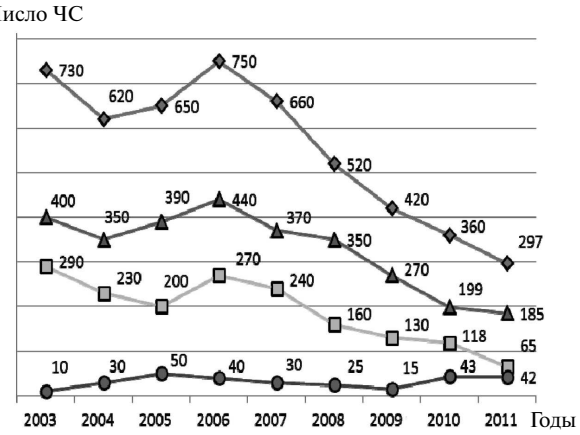


Рис. 1. Динамика чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации за период 2003–2011 годы (— всего ЧС; —природные; — техногенные; — биолого-социальные)

Таким образом, на основании проведенного анализа и обобщения сформировавшегося в Российской Федерации спектра опасностей и угроз можно заключить, что в условиях их возрастания все более актуальной становится проблема обеспечения безопасности и защиты объектов экономики от поражающего воздействия различных чрезвычайных ситуаций, возникающих в мирное время, а также от опасностей, ведении военных действий или вследствие этих действий.

При решении данной проблемы в Российской Федерации реализуется системный подход, связанный, как это показано на рис. 2, с развертыванием на территории страны системы гражданской обороны и Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), а также осуществлением совокупности федеральных, ведомственных и территориальных целевых программ предупреждения чрезвычайных ситуаций и повышения устойчивости объектов и территорий к их поражающему воздействию.

В соответствии с требованиями, установленными Правительством Российской Федерации, система гражданской обороны и РСЧС развертываются на федеральном, региональном (для РСЧС дополнительно — на межрегиональном), муниципальном и объектовом уровнях [8, 9].

Рис. 2. Системный подход к решению проблем обеспечения безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций объектов экономики

При этом объектовый уровень указанных систем включает в себя организации, учреждения и предприятия всех организационно-правовых форм и форм собственности. На них в соответствии с законодательством Российской Федерации [10, 11] организуется и ведется объектовая гражданская оборона, а также создается объектовое звено РСЧС для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Именно объектовый уровень развертывания указанных систем и составляет основание всей пирамидальной структуры, как это показано на рис. 3.

Анализ законодательства и других документов [12, 13] показал, что главная особенность объектового уровня ГОЧС — функционирование на нем более 656 тыс. производственных предприятий, в том числе 250342 предприятий, эксплуатирующих 592134 опасных производственных объекта, из которых 3770 объектов имеют запасы опасных веществ в количествах равных или превышающих установленные законодательством Российской Федерации нормы содержания опасных веществ на опасных производственных объектах [13].

Возникновение чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах создает высокую степень опасности воздействия на окружающую природную среду, население и другие объекты, расположенные на сопредельных территориях, вторичных факторов поражения. Все это обусловливает объективную потребность принятия и реализации на объектовом уровне указанных систем всех надлежащих мер и действий для обеспечения высокой эффективности функционирования объектового звена ГОЧС не только непосредственно на опасных производственных объектах, но и на всех иных объектах, попадающих в зону поражающего действия вторичных факторов при возникновении техногенной чрезвычайной ситуации на опасном производственном объекте.

Другая важная особенность объектового уровня ГОЧС, подтверждающая необходимость осуществления эффективной объектовой гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций, закрепленная законодательством Российской Федерации [10, 11] за организациями, учреждениями и предприятиями всех организационно-правовых форм и форм собственности, — самодостаточность в решении задач гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций, в соответствии с которой они осуществляют проведение мероприятий гражданской обороны, а также ликвидацию локальных чрезвычайных ситуаций и участие в ликвидации других чрезвычайных ситуаций за счет использования собственных сил и средств

Рис. 3. Структура системы гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций (РСЧС) в Российской Федерации

Вместе с тем в результате проведенных исследований установлено, что именно объектовый уровень гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций в настоящее время можно считать наиболее слабым звеном указанных систем. Это объективно обусловлено целым рядом факторов современных условий социально-экономического развития страны, основными из которых являются [14,17]:

высокая подвижность и нестабильность самого основания пирамидальной организационной структуры указанных систем, обусловленные в реальных условиях рыночной экономики ежегодным возникновением и прекращением существования многих сотен тысяч юридических лиц, в т.ч. организаций, учреждений и предприятий (вследствие их слияния и разделения, выделения и присоединения, реорганизации и ликвидации, в т.ч. форме банкротства);

отсутствие в условиях высокой подвижности основания возможности для обеспечения преемственности кадров, знаний, опыта, информационных и материальных ресурсов на объектовом уровне ГОЧС. При прекращении существования юридических лиц, как правило, ликвидируются все их организационные структуры, в том числе объектовые структуры указанных систем и их информационные ресурсы, а также в большинстве случаев происходит инициированное руководством возникающих новых юридических лиц массовое замещение кадрового состава. В этих условиях каждое возникающее на базе ликвидируемых объектов экономики и социальной сферы новое юридических лицо в большинстве случаев обречено на осуществление с нулевого состояния всего комплекса мер и действий по организации, созданию и обеспечению функционирования объектовой гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций;

недооценка руководством и персоналом объектов экономики роли, места и значения объектовой гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций как базовой основы безопасности и устойчивости их функциони-

рования по соответствующему профилю деятельности, восприятие в большинстве случаев всей совокупности мер и действий, осуществляемых в указанных системах, как дополнительной нагрузки, не связанной непосредственно с содержанием и результатами основных направлений деятельности каждого объекта;

наличие многочисленных абстрактных или дискуссионных положений в законодательстве и иных нормативных правовых актах по вопросам гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций Российской Федерации, способствующих возникновению в указанных областях многочисленных противоречий и проблем, снижающих эффективность и качество функционирования объектового уровня ГОЧС. Подтверждением служит, например, то, что в законодательстве и иных нормативных правовых актах отсутствуют конкретные алгоритмы действий руководства объектов экономики и социальной сферы по созданию и обеспечению функционирования гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций на объектовом уровне. В действующем законодательстве установлены единые требования к организации применения нештатных аварийно-спасательных формирований, особенно добровольных и общественных формирований, как правило не имеющих официальных аттестационных документов, которые бы допускали их к проведению связанных с высоким риском для жизни и здоровья людей аварийно-спасательных и других неотложных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций. Поэтому закрепление в положении об РСЧС [9] за руководителем аварийно-спасательного формирования или аварийно-спасательной службы (не уточняется какого — территориального или объектового, штатного или нештатного, добровольного или общественного), первым прибывшего в район чрезвычайной ситуации, полномочий руководителя ликвидации данной чрезвычайной ситуации представляется достаточно дискуссионным и требует уточнения, особенно в связи с внесением изменений в Федеральный закон от 21 декабря 1994 года № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [16]. Трудовое законодательство [15], касающееся заключения между работодателем и работником трудового соглашения (трудового договора) и составляющее функциональную и юридическую основу всей совокупности их правоотношений, не содержит конкретных указаний по этим вопросам. Содержанием таких соглашений (трудовых договоров) не предусматривается конкретная деятельность работников непрофильных подразделений в области гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций в качестве реализации ими основной трудовой функции, в том числе при ведении аварийно-спасательных и других неотложных работ, связанных с высоким риском для жизни и здоровья людей [2, 9–11];

нерешенность на государственном уровне комплекса проблем, связанных с финансовым и другими видами обеспечения гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций на объектовом уровне, где в соответствии с законодательством предусматривается осуществление организациями всего комплекса мер и действий по ведению гражданской обороны, предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций за счет собственных средств [10, 11]. Отсутствие позитивных сдвигов в решении данной проблемы порождает повсеместную практику недофинансирования или полного отсутствия такового в области гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций на объектовом уровне, что в условиях рыночных отношений практически исключает возможность развития и совершенствования этих важнейших компонентов обеспечения безопасности и устойчивого развития личности, общества и государства применительно к большинству организаций, учреждений и предприятий.

С учетом влияния указанных факторов и особенностей объектового уровня гражданской обороны и РСЧС в качестве одного из подходов к решению проблемы обеспечения безопасности объектов экономики, социального и иного назначения представляется целесообразным использовать разработаный в результате исследований [2, 4, 20, 21] единый методический алгоритм действий по созданию объектового звена систем гражданской обороны и РСЧС, типовой перечень разрабатываемых на объектовом уровне документов по этим вопросам, единый подход к оценке рисков чрезвычайных ситуаций и методику оценки уязвимости

объектов от их поражающего воздействия, а также разработанные рекомендации по обеспечению безопасности объектов образования от проявления террористических угроз.

Такой подход согласуется со Стратегией национальной безопасности РФ до 2020 года, в соответствии с которой защита от чрезвычайных ситуаций достигается путем совершенствования и развития единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [1].

Реализация указанного подхода обеспечит последовательное создание на объектах экономики, социального и иного назначения объектовой системы обеспечения их комплексной защиты от опасностей и угроз современного мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года [Текст] / утверждена Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 г. № 537.

2. **Добровольский, В.С.** Гражданская оборона и защита в чрезвычайных ситуациях на объектах экономики и социальной сферы. [Текст] / В.С. Добровольский, К.А. Дубаренко.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 258 с.

3. [Электрон. ресурс] http://www.rg.ru/2011/07/05/iznos.html

4. Разработка методики оценки уязвимости высших учебных заведений Министерства образования и науки Российской Федерации в чрезвычайных и кризисных ситуациях [Текст] / Б.С. Мастрюков, Р.Н. Казаков, О.М. Зиновьева, В.С. Добровольский.— НИТУ МИСиС, Отчеты по НИР за 2006 г.— М., 2006.

5. **Радоуцкий, В.Ю.** Комплексная безопасность высших учебных заведений [Текст] / В.Ю. Радоуцкий, В.Г. Шаптала, В.Н. Шульженко, В.С. Добровольский, А.Н. Овечкин.— СПб.: Инфо-да, 2008.

6. Словарь терминов МЧС [Текст] / МЧС.— М., 2010.

7. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2011 году».— М.: МЧС РФ, 2012.

8. Постановление Правительства Российской Федерации от 26 ноября 2007 г. № 804 г. «Об утверждении Положения о гражданской обороне в Российской Федерации».

9. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».

10. Федеральный закон от 12 февраля 1998 года № 28— ФЗ «О гражданской обороне».

11. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68 –ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

12. Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

13. [Электрон. ресурс] http://protown.ru/information/hide/7914.html

14. **Добровольский, В.С.** Защита в чрезвычайных ситуациях [Текст]: учебное пособие для студентов вузов с грифом Минобразования России / В.С. Добровольский, М.Н.Дудко.— М.: Русский мир, 2004.— 465 с.

15. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ (с изменениями от 24, 25 июля 2002 г., 30 июня 2003 г., 27 апреля, 22 августа, 29 декабря 2004 г., 9 мая 2005 г.).

16. Федеральный закон от 1 апреля 2012 г. № 23— ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

17. Разработка системы комплексной безопасности объектов образования и науки в кризисных ситуациях [Текст]: отчет по НИР / Г.А. Смирнов, Н.В. Гаранина, В.С. Добровольский / ЗАО Центр комплексных программ «Галит».— М., 2005. 168 с.

18. Доктрина информационной безопасности [Текст] / Утверждена Президентом Российской Федерации.

19. [Электрон. ресурс] http://www.school-obz.org/.

20. **Добровольский, В.С.** Об организации гражданской обороны и защита от чрезвычайных ситуаций объекта экономики [Текст]: Учебное пособие / В.С. Добровольский.— М.: Изд-во УМЦ по ГО и ЧС г. Москвы, 2011.— 250 с.

21. **Добровольский, В.С.** Состояние и обеспечение безопасности объектов образования от проявления террористических угроз: Аналитический обзор [Текст] / В.С. Добровольский, А.Н. Овечкин, А.А. Павлов. — М.: Минобрнауки России, 2006.— 34 с.

ДОБРОВОЛЬСКИЙ Валерий Станиславович — *кандидат военных наук, профессор кафедры экономической теории Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов»*.
119991, Ленинский проспект, 4 (Б-513), Москва, Россия
(495) 955-00-67
polit_ec@mail.ru

ДУБАРЕНКО Константин Андреевич — *кандидат исторических наук заведующий кафедрой экстремальных процессов в материалах и взрывобезопасности института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552–98–24
bsts@fkb.spbstu.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 628

В.А. Шкаликов, А.В. Бышевская

ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОТОКОВ НА СОСТОЯНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

(На примере Смоленской области)

V.A. Shkalikov, A.V. Byshevskaya

EFFECTS OF WATERCOURSES ON THE CONDITION OF MOTOR ROAD

(illustrated Smolensk region)

В статье приведены результаты обследования водопропускных сооружений на дорогах Смоленской области. В местах устройства этих сооружений выявлены изменения в состоянии дорог, связанные с недостаточным учетом особенностей гидрологического режима малых водотоков, возможностей появления размывов, подтопления земель и других негативных процессов. Приведены примеры наиболее частых чрезвычайных ситуаций на дорогах, возникающих в результате ошибок в проектировании водопропускных сооружений, низкого качества их строительства, несвоевременного устранения появляющихся неблагоприятных изменений в их состоянии.

ДОРОГИ. ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ. МАЛЫЕ ВОДОТОКИ. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ. ВОДОПРОПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ. ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ.

The results of the survey culverts on roads Smolensk region. Revealed changes in the state of roads in areas of the device structures of insufficient taking into account peculiarities of the hydrological regime of small streams, may cause erosion, waterlogging and other negative processes. Are examples of the most common emergency situations on the roads, arising from errors in the design of culverts, poor quality of construction, elimination of late emerging adverse changes in their condition.

ROADS. WATER BODIES. SMALL STREAMS. HYDROLOGY. CULVERTS. NEGATIVE CONSEQUENCES; EMERGENCIES.

Водные объекты являются существенным препятствием в строительстве дорог. Изменения, аномальные проявления в режиме функционирования водотоков, связанные с сезонной динамикой, резким изменением погоды, приводят нередко к развитию на дорогах ряда негативных процессов. В связи с этим в каждом регионе развитие дорожной сети, затраты на строительство, эксплуатацию дорог должно осуществляться не только на основе правильной оценки ландшафтного устройства территории, но и необходимости учета особенностей распространения водных объектов, их размеров, возможностей появления негативных процессов на дорогах, связанных с изменениями в их водном режиме. Рассмотрим необходимость такого учета на примере Смоленской области.

В территорию Смоленской области входят верхние участки водоразделов трех крупных рек Европы — Волги, Днепра и Западной Двины. Основная ее часть (57 %) входит в бассейн Днепра (собственно Днепра и двух его крупных притоков — Сожа и Десны); восточная и юго-восточная (26 %) — в бассейн Волги, а именно ее притоков первого (Вазуза) и второго (Угра) порядков, северо-западная (17 %) — в бассейне Западной Двины (ее притоков первого порядка — Каспли, а также второго порядка — Ельши). Водораздельное положение области обусловливает преобладание на ее территории малых рек. В ее пределах насчитывается 1149 водотоков с постоянным течением. Из них всего четыре реки имеют длину свыше 200 км (Днепр — 503 км, Угра — 257 км, Остер — 227 км, Сож — 213 км). Одиннадцать рек имеют длину от 100 до 200 км. Рек протяженностью от 25 до 100 км насчитывается 55 [2].

Распространение здесь преимущественно малых водотоков следует считать благоприятным условием для строительства дорог. Но особенности климатических условий, рельефа и почвообразующих пород обеспечивают на ее территории значительную густоту речной сети. По отдельным ландшафтам она изменяется в основном от 0,30 до 0,60 км/км^2. Наиболее значительна она (от 0,40 до 0,60 км/км^2 и более) на северо-западе области [1].

Повышенная густота речной сети на северо-западе области была одной из причин слабого развития здесь дорог, особенно в указанных ландшафтах. Трудности строительства дорог в пределах этой территории по сравнению с остальной частью области обусловлены и наличием намного более значительного распространения болот. Наибольшие препятствия для дорожного строительства представляют здесь крупные торфяники.

Чрезвычайные ситуации, связанные с воздействием талых снеговых и ливневых вод, возникают чаще на дорогах крупных населенных пунктов. Основные причины этого — заполнение водопропускных устройств мусором, недостаточное внимание проведению необходимых мероприятий для регулирования поверхностного стока при строительстве зданий и сооружений, неправильно проведенные расчеты гидрологических характеристик при проектировании водопропускных сооружений. Так на р. Вязовенька, протекающей по восточной окраине г. Смоленска, в 2006, 2012 годах, в период половодья возникла одна и та же ситуация, быстро ликвидировать последствия которой не удалось. Всего за одну ночь уровень воды в пруду на реке в весенние периоды этих лет поднимался так быстро, что три водопропускные трубы не справлялись со сбросом воды. В результате дорогу на поселок размывало. Прерывалось сообщение между поселком и городом.

Из-за быстрого подъема воды весной 2012 года размывы дорог были отмечены на переходах через малые водотоки и в других местах области. Наиболее значительным был размыв полотна дороги Духовщина — Ярцево в районе д. Третьяково, вызванный прорывом плотины пруда.

Для малых рек, ручьев на территории области характерен ряд особенностей гидрологического, гидрохимического, ледового режимов, что весьма важно учитывать при создании дорожных переходов. Гидрологический режим большей их части отличается значительными различиями расходов воды в межени и в периоды половодий и паводков, большими изменениями скорости течения в отдельные фазы водного режима. В результате этого велика опасность размыва полотна дорог при ошибках в выборе диаметра водопропускных труб, неправильном выборе или некачественном строительстве водосбросных сооружений при прокладке дорог, пересекающих водотоки, плотин на создаваемых прудах. Нередки появления оползней, оплывин на откосах полотна дорог в местах пересечения ими водотоков. Часты разрушения оголовков водопропускных труб, бетонных и иных креплений откосов дорожного полотна на переходах. В отдельных случаях в теле плотин можно наблюдать образование промоин под водопропускной трубой. В результате подмыва грунта у основания труб, что чаще наблюдается в нижнем бьефе, возникают деформации и разрушения отдельных элементов водопропускных систем.

Дороги в области на многих участках проложены по склонам, нередко имеющим значительную длину. На таких участках при несоблюдении необходимых требований к поперечному профилю дороги на ней в нижней части склона (обычно возле водопропускных сооружений) порой накапливается значительное количество воды. В результате этого происходит размыв откосов дорожного полотна. Образующиеся в таких случаях промоины можно наблюдать даже на дорогах федерального значения. Так, значительных размеров промоины в течение многих лет существуют на откосах по обе стороны дороги Смоленск — Рославль на переходе через р. Ясенная.

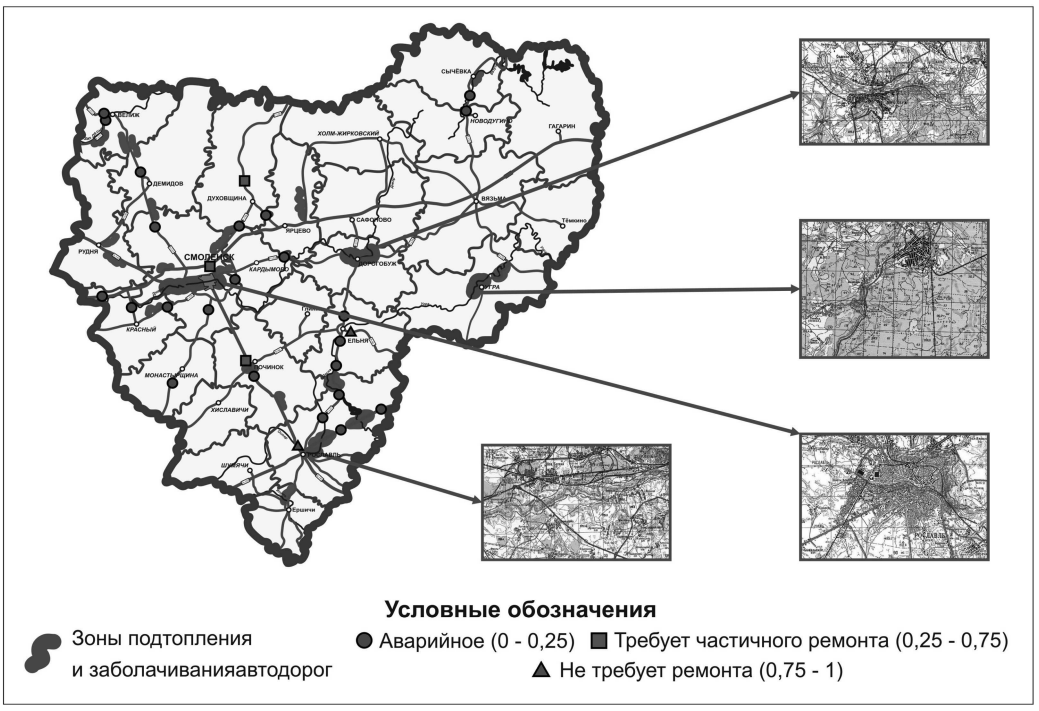
Чаще повреждение полотна и водопропускных сооружений происходит на дорогах местного значения, которые отличаются более низким качеством строительства. Не всегда при проектировании таких дорог используют правильно рассчитанные характеристики стока, особенно максимальных расходов воды. В весенний период в виду углекислой агрессивности талых снеговых вод в ряде случаев наблюдаются разрушения отдельных элементов водопропускных сооружений. Это обычно отмечается в случаях сооружения их из цемента низких марок.

Проведенное нами в 2010–2012 годах обследование водопропускных сооружений на дорогах области, пересекающих малые водотоки, показало, что разного рода разрушения характерны для большей части этих сооружений. Так на дороге г. Смоленск — пос. Красный почти на 70 % переходов были выявлены различные разрушения полотна насыпи и водопропускных сооружений. Возле водопропускных сооружений обычны деформации плит на откосах дорожного полотна, возникающие в результате подвижек грунта из-за морозного пучения, сплыва грунта, защитных бетонных блоков возле оголовков водопропускных труб. Нередки размывы грунта на откосах дорожного полотна возле водопропускных сооружений, а также у оснований насыпи в нижнем бьефе (рис.). Эти и другие неблагоприятные изменения в состоянии дорог на переходах, если они не приводят к появлению чрезвычайных ситуаций, обычно своевременно не устраняют.

Повреждения, а иногда и разрушения мостов возможны в период ледохода. В большей степени они характерны для средних и крупных рек. Льдом повреждаются иногда и оголовки водопропускных труб, откосы полотна дорог возле мостов. Опасности размыва полотна дорог возникают иногда по причине заполнения не только крупным мусором, но и льдом водопропускных труб.

В прошлом были частыми на Смоленщине разрушения деревянных мостов. Строили их почти на всех реках даже в недалеком прошлом. Обычно разрушения происходили в половодья, отличающиеся наиболее высоким подъемом воды, и после суровых зим, в которые лед достигал значительной толщины, а льдины в период ледохода имели большие размеры.

На многих, особенно небольших, водотоках, мосты строили обычно местные жители, технологии строительства были часто примитивными, не достаточно учитывались отдельные особенности гидрологического режима рек. Данные опроса старожилов деревень, расположенных по берегам ряда рек области показывают, что на таких реках, как Вихра, Сож, Остер, Стометь и ряде других водотоков, для которых была характерна низкая залесенность водосборов, снос мостов весной был чаще, чем на реках, в бассейнах которых преобладали лесные угодья. Пик



Оценка в баллах изменения гидрологического режима
и состояния придорожных гидротехнических сооружений

половодья на таких реках был особенно заметно выражен. На отдельных реках разрушение мостов происходило с частотой один раз в 7–10 лет. Ремонтировать мосты после половодья на многих реках приходилось почти ежегодно.

Разрушение мостов на Смоленщине, особенно построенных по проектам в последние десятилетия, — явление редкое. Наиболее крупная из таких чрезвычайных ситуаций, возникшая в наступившем веке в пределах области, — разрушение моста через реку Десну на автомобильной дороге А-101 Москва — Малоярославец — Рославль до границы с Республикой Беларусь (на Бобруйск, Слуцк). Произошло это на 351 км от Москвы 6 августа 2006 года. Разрушился мост при проведении работ по его капитальному ремонту. Основной причиной обрушения моста явилось отсутствие системы сцепления тела опоры с ростверком (фундаментом) свайного основания в результате скрытых дефектов допущенных при его строительстве.

Преобладание малых рек на территории области позволило строить многие дороги относительно большой протяженности без сооружения мостов. В основном это старые, реконструированные полностью или частично дороги, которые прокладывали с учетом особенностей существующей гидрографической сети. Проходят они на значительном протяжении вблизи водоразделов с наличием в отдельных местах поворотов малого радиуса. Мостов на таких дорогах в настоящее время нет или их очень мало. К таким дорогам относятся старая дорога Смоленск — Демидов, дороги Ельня — Дорогобуж, Починок — Ельня, Вязьма — Сычевка и другие. Мало мостов имеют и дороги, построенные во второй половине прошедшего века, не имеющие поворотов малого радиуса, т. е. построенные с учетом современных технологий и требований к эксплуатации. Такими дорогами являются: Ольша — Велиж (два моста через р. Касплю), Демидов — Пржевальское (мост через р. Половью). На этих дорогах негативное воздействие ручьев и рек на состояние дорог проявляется в заметно меньшей степени.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что негативное воздействие особенно небольших по размерам водотоков на состояние дорог в полной мере не учитывается. Причиной возникающих в местах устройства водопропускных сооружений неблагоприятных изменений в состоянии дорог являются чаще ошибки в гидрологических расчетах при проектировании водопропускных сооружений, проводимые без учета изменений в стоке при освоении водосборов малых водотоков, активизация эрозии, рост количества свалок в эрозионных формах рельефа и объема мусора в них. Возникающие неблагоприятные изменения вовремя не устраняются, что приводит нередко к появлению различной тяжести чрезвычайных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Смоленской области [Текст].— М.: Издат. центр «Вентана-Граф», 1997.— С.15.

2. Природа Смоленской области [Текст]/ Под ред. В.А. Шкаликова. Смоленск: Изд-во «Универсум», 2001. — 421 с.

ШКАЛИКОВ Виктор Андреевич — *доктор технических наук, профессор кафедры физической географии Смоленского государственного университета.*
214018, пр. Гагарина, 23, г. Смоленск, Россия
(4812) 32-13-31,
E-mail: shkalikov.v@mail.ru

БЫШЕВСКАЯ Анастасия Владимировна — *преподаватель Смоленской государственной академии физической культуры, спорта и туризма.*
214018, пр. Гагарина, 23, г. Смоленск, Россия
nastya_slastya@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 614.8:627.8

В.И. Гуменюк, А.М. Кармишин, В.А.Киреев

О КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ ОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ

V.I. Gumenjuk, A.M. Karmishin, V.A. Kireev

ABOUT QUANTITATIVE INDICATOR OF DANGER MAN-MADE ACCIDENTS

Рассматриваются вопросы обоснования наиболее полных и интегральных пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий и общие интегральные представления для их оценки. формулируются практически важные задачи, которые должны решаться с использованием обоснованных показателей

ТЕХНОГЕННАЯ АВАРИЯ. НАСЕЛЕНИЕ. ПЕРСОНАЛ. ОБОБЩЕННЫЙ ФАКТОРНО-ВРЕМЕННОЙ ЗАКОН ПОРАЖЕНИЯ. СТЕПЕНЬ ТЯЖЕСТИ ПОРАЖЕНИЯ. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОПАСНОСТИ.

Problems of substantiation of total and integral spatial-temporal hazard indices of anthropogenic emergencies as well as general integral representations for their evaluation are considered. Practically important tasks which have to be solved with the use of theoretically justified indices are defined.

ANTHROPOGENIC EMERGENCY. POPULATION. STAFF. GENERALIZED FACTORIAL-TEMPORAL EXPOSURE LAW. EXTENT OF EXPOSURE. SPATIAL-TEMPORAL HAZARD INDICES.

Среди важнейших задач обеспечения промышленной безопасности — обоснование показателей опасности техногенных аварий и разработка методов их теоретической оценки.

Промышленная безопасность складывается из двух составляющих: безопасности персонала и населения при штатном функционировании предприятий и безопасности персонала и населения при возникновении на предприятиях техногенных аварий различной природы. В современном мире в силу объективных и субъективных причин опасность техногенных аварий возрастает, поэтому обеспечение безопасности персонала и населения, особенно при расположении потенциально опасных промышленных объектов в (около) крупных населенных пунктах, — чрезвычайно важно и актуально [1].

Понятие «безопасность» — аксиоматично, не требует определения. Невозможно ввести количественный показатель собственно безопасности, но можно ввести количественный показатель опасности, уровень которой определяет и уровень безопасности. О безопасности судят по уровню потенциальной или реализованной опасности. Если уровень опасности не превосходит некоторого директивно заданного значения, то делается вывод о безопасности для персонала промышленного объекта и населения. Качественно можно вводить различные уровни безопасности в зависимости от того, какой существует уровень опасности (потенциальной или реализованной). Из изложенного следует, что для суждения о безопасности или ее уровнях необходимо уметь оценивать опасность потенциально опасного промышленного объекта, в том числе и при аварии на нем.

Следует отметить, что в общем случае поражающее действие аварий на потенциально опасных промышленных объектах, а особенно химически, биологически и радиационно опасных, как известно, реализуется в пространстве и времени. В связи с этим показатели опасности техногенных аварий должны непосредственно характеризовать эти два свойства.

Обоснование пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий и разработка теоретических методов их оценивания — актуальная научная проблема, требующая решать практически важные задачи:

ранжировать объекты по уровню опасности;

вырабатывать технические и, на этой основе, управленческие решения по снижению опасности до допустимого (психологически приемлемого) уровня на различных этапах жизненного цикла объекта (проектирование, эксплуатация, вывод из эксплуатации);

обосновывать требования к системе защиты персонала и населения, в том числе и по оперативности ее функционирования;

оптимизировать распределение выделяемых финансовых ресурсов на снижение опасности промышленного объекта по критерию максимального снижения его потенциальной опасности и т. п.

Несмотря на актуальность оценивания опасности техногенных аварий (катастроф), до настоящего времени существует ряд принципиальных нерешенных проблем [1]:

отсутствуют общепринятые показатели опасности техногенных аварий потенциально опасных промышленных объектов и соответствующие методы их теоретической оценки;

практически не разработаны стохастические методы описания последствий техногенных аварий, что не позволяет гарантированно оценивать уровень их опасности;

существующие методики оценки последствий техногенных аварий разработаны для простейших случаев, когда есть только один поражающий фактор, и не учитывают комбинированного действия поражающих факторов, в результате которого происходит усиление (синергизм) поражающего действия аварий.

При обосновании показателей последствий техногенных аварий широко применяются идеи квалиметрии. Применительно к рассматриваемой проблеме с позиции квалиметрии возникают четыре принципиальных проблемы:

квантификация, т. е. разработка количественных показателей опасности техногенных аварий;

детерминизация, т. е. освобождение от стохастических факторов либо их использование для получения детерминированных оценок показателей опасности;

освобождение от неопределенных факторов, т. е. разработка системы ограничений и допущений с учетом неопределенных факторов;

скаляризация, т. е. получения скалярных, а не векторных показателей опасности.

В рамках решения проблемы квантификации обосновано, что показатели опасности техногенных аварий можно разделить на пространственные и временные.

Пространственными показателям опасности являются следующие [1]:

вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести человека (элементарного объекта), находящегося в точке (x, y) относительно аварийного объекта. Это простейший (локальный, дифференциальный) показатель опасности, он далеко не в полной мере характеризует опасность техногенной аварии, так как можно выбрать сколь угодно много точек (x, y), вероятность поражения на которых может изменяться от 0 до 1;

средняя вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести на некоторой площади $S_{\overline{P}}$ (следует отметить, что площади со средней вероятностью поражения соответствует та же площадь с некоторой граничной вероятностью поражения S_P). Это более полный показатель опасности по отношению к рассмотренному выше, но и он далеко не в полной мере характеризует опасность аварии, так как можно выбрать множество изолиний с различными вероятностями поражения, в пределах которых будут находиться большие или меньшие площади;

поле вероятностей поражения не ниже заданной степени тяжести, или, другими словами, координатный закон поражения, который можно рассматривать как наиболее полный показатель опасности аварий, позволяющий получать другие показатели опасности более высокого уровня.

В отношении временных характеристик необходимо отметить, что, с одной стороны, поле поражающего фактора при техногенной аварии формируется не мгновенно, а в течение некоторого времени, а с другой стороны, поражающее действие многих факторов, например токсичных химических веществ, в аварийном состоянии также проявляется не мгновенно, а в течение некоторого времени.

В связи с этим к простейшим временным показателям опасности техногенных аварий [2, 3] относят:

время проявления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести в заданной точке пространства;

продолжительность проявления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести в заданной точке пространства.

Наиболее полными временными показателями опасности техногенной аварии (по аналогии с пространственными) будут перечисленные выше показатели, отнесенные ко всей площади поражения:

закон распределения случайного времени проявления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести у населения на всей площади поражающего действия $G(t)$;

закон распределения случайной продолжительности проявлений эффектов поражения у населения (персонала) на всей площади поражающего действия $G(\tau)$;

Из всех рассмотренных временных показателей принципиальное значение имеет закон распределения случайного времени проявления поражений не ниже заданной степени тяжести (временной закон поражения), так как именно он непосредственно характеризует временную реализацию опасности техногенной аварии. Этот закон описывает вероятность того, что время проявления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести на всей площади поражения будет меньше некоторой величины:

$$F(t) = P\{\tilde{t} < t\}. \qquad (1)$$

Данный закон можно рассматривать как временной аналог координатного закона поражения.

Получено общее интегральное представление закона (1), которое в некоторых частных случаях имеет аналитическое решение

$$G(t) = \int_0^t \frac{\int_0^{S_\text{п}} P(D) f_N(S) f_{N_\text{п}}(t) dS(D)}{\int_0^{S_\text{п}} P(D) f_N(S) dS(D)} dt, \qquad (2)$$

где $S_\text{п}$ — общая площадь поражающего действия техногенной аварии, $[L^2]$; $f_N(S)$ — плотность распределения населения в пределах площади $S_\text{п}$, $[L^{-2}]$; $P(D)$ — факторный закон поражения; $f_{N_\text{п}}(t)$ — плотность распределения случайного времени наступления эффектов поражения заданной степени тяжести при действии при действии поражающего фактора величиной D, $[T^{-1}]$; t — время, прошедшее после воздействия поражающего фактора, $[T]$.

Если население в пределах общей площади поражающего действия аварии распределено равномерно, то из соотношения (2) следует взаимосвязь наиболее полных пространственных и временных показателей и интегрального пространственного показателя опасности техногенной аварии:

$$G(t) = \int_0^t \frac{\int_0^{S_\text{п}} P(D) f_{N_\text{п}}(t) dS(D)}{\int_0^{S_\text{п}} P(D) dS(D)} dt =$$

$$= \int_0^{S_\text{п}} \frac{\int_0^t P(D) f_{N_\text{п}}(t) dS(D)}{\int_0^{S_\text{п}} P(D) dS(D)} dt =$$

$$= \frac{1}{S_0} \int_0^{S_\text{п}} G_t(S) dS = \frac{S_0(t)}{S_0}, \qquad (3)$$

где $\int_0^t P(D) f_{N_\text{п}}(t) dS(D) = G_t(S) = G_t(x,y)$ — координатный закон поражений не ниже заданной степени тяжести, наступающих к моменту времени t; $S_0 = \int_0^{S_\text{п}} P(D) dS(D)$ — приведенная зона поражения, $[L^2]$.

Несмотря на то, что координатный и временной законы поражения являются сложными функциями и зачастую могут быть рассчитаны только численными методами, по ним достаточно сложно анализировать и сравнивать различные техногенные аварии, в интересах, например, ранжирования промышленных объектов по степени опасности.

В связи с этим в интересах решения проблемы скаляризации в рассмотрение можно ввести пространственные и временные интегральные показатели опасности техногенных аварий.

В качестве пространственных интегральных показателей опасности в настоящее время рассматриваются начальные и центральные моменты КЗП. Так, начальные моменты КЗП порядка $\alpha + s$ записываются следующим образом:

$$m_{\alpha,s} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^\alpha y^s G(x,y) dxdy. \qquad (4)$$

Если $v = s = 0$, то говорят о нулевом начальном моменте КЗП

$$m_0 = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} G(x,y)\,dxdy = S_0, \qquad (5)$$

который в силу особой важности получил специальные обозначение A_0 и название «приведенная зона поражения».

Следует отметить, что приведенная зона поражения имеет различные трактовки:

геометрическую — как условной площади, в пределах которой элементарный объект получает поражение не ниже заданной степени тяжести с вероятностью равной единице;

трактовку с точки зрения КЗП, которая считает приведенную зону поражения простейшей, одноступенчатой аппроксимацией КЗП (может использоваться при обосновании эффективности осуществляемых мероприятий защиты населения)

$$G(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{если } x,y \in A_0; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

*трактовку с позиций квалиметрии** — как главного (интегральный, обобщенный) показателя опасности техногенной аварии; он может применяться для решения различных практически важных задач, например ранжирования объектов по степени их опасности в интересах принятия управленческих решений.

Аналогичные идеи можно применить и для временного закона поражения. Однако начальный момент от $F(t)$ порядка α не существует, так как интеграл

$$\int_0^{\infty} t^{\alpha} F(t)\,dt = \infty$$

является расходящимся.

Однако можно найти начальные моменты порядка α от функции $1 - F(t) = q(t)$, которая описывает вероятность того, что к заданному моменту времени у пораженного населения эффекты поражения не ниже заданной степени тяжести еще не проявятся:

$$m_{\alpha} = \int_0^{\infty} t^{\alpha}\left[1 - F(t)\right]dt\,. \qquad (6)$$

Тогда при $\alpha = 0$ будем иметь нулевой начальный момент, который также получил специальные обозначение t_0 и название «приведенное время непоражения»:

$$t_0 = \int_0^{\infty}\left[1 - F(t)\right]dt\,. \qquad (7)$$

Исходя из выражения (7) под приведенным временем непоражения понимают условное время, в течение которого с вероятностью равной единице поражения не ниже заданной степени тяжести у пораженного населения не проявятся [1, 3].

Из определения приведенного времени непоражения следует: чем оно меньше, тем быстрее реализуется опасность техногенной аварии и тем более опасна рассматриваемая авария.

По аналогии с интегральным пространственным показателем опасности аварии — приведенной зоной поражения — интегральному временному показателю опасности — приведенному времени непоражения — можно дать следующие трактовки:

геометрическую трактовку как условного времени, в течение которого у пораженных не проявляются эффекты поражения не ниже заданной степени тяжести (обосновывалось выше);

трактовку с точки зрения временного закона поражения как простейшей, одноступенчатой аппроксимации временного закона поражения

$$F(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \le t_0; \\ 1, & \text{если } t > t_0; \end{cases}$$

трактовку с позиций квалиметрии, которая считает приведенное время непоражения главной (интегральная, скалярная) временной характеристикой опасности аварии (ведением в рассмотрение приведенного времени непоражения решена проблема скаляризации временных показателей опасности аварии).

Можно показать, что приведенное время непоражения численно равно математическому ожиданию случайного времени проявления эффектов поражения на всем поле поражающего действия техногенной аварии.

Все пространственные и временные показатели опасности техногенных аварий по своей сути являются непрерывными случайными ве-

* Квалиметрия — наук о количественных показателях качества технической продукции

Виды законов поражения

Название закона	Интегральное представление	Учитываемые случайные величины (вариабельность объектов)
Факторные законы		
Условный статический	$P_{\text{ус}}(D, D_{50}) = \int_0^D \varphi(\tilde{D})\,d\tilde{D}$	Токсодоза $\tilde{D}$, вызывающая заданный эффект поражения
Условный динамический	$P_{\text{ув}}(D, D_{50}) = \int_0^\infty P_{\text{ус}}(D, D_{50}) f(D)\,dD$	Токсодоза D в заданной точке x, y
Безусловный статический	$P_{\text{бс}}(D, D_{50}) = \int_0^\infty P_{\text{ус}}(D, D_{50}) f(D_{50})\,dD_{50}$	Оценка величины D_{50}
Безусловный динамический	$P_{\text{бд}}(D, D_{50}) = \int_0^\infty \int_0^\infty P_{\text{ус}}(D, D_{50}) f(D_{50}) f(D)\,dD\,dD_{50}$	Токсодоза D в заданной точке x, y; оценка величины D_{50}
Факторно-временные законы		
Условный статический	$P_{\text{ус}}(D,t) = \int_0^D \int_0^t \varphi(\tilde{D},\tilde{t})\,d\tilde{t}\,d\tilde{D}$	Токсодоза $\tilde{D}$, вызывающая заданный эффект поражения, и время его проявления
Условный динамический	$P_{\text{уд}} = \int_0^\infty P(D, D_{50}, t, t_{50}) \varphi(D)\,dD$	Токсодоза D в заданной точке x, y
Безусловный статический	$P_{\text{бс}} = \int_0^\infty \int_0^\infty P(D, D_{50}, t, t_{50}) \varphi(D_{50}) \varphi(t_{50})\,dD_{50}\,dt_{50}$	Оценки величин D_{50} и t_{50}

Окончание табл.

Название закона	Интегральное представление	Учитываемые случайные величины (вариабельность объектов)
Безусловный динамический	$P_{\text{бд}} = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty P_{\text{ус}}(D, D_{50}, t, t_{50}) \varphi(D) \varphi(D_{50}) \varphi(t_{50}) dD dD_{50} dt_{50}$	Токсодоза D в заданной точке x, y; оценки величин D_{50} и t_{50}
Двумерный факторный закон (при комбинированном действии двух поражающих факторов)		
Условный статический	$P_{\text{ус}} = 1 - \int_{D_A}^\infty \int_{D_B}^\infty \varphi(\tilde{D}_A, \tilde{D}_B) d\tilde{D}_A d\tilde{D}_B$	Токсодозы двух АХОВ $\tilde{D}_{\text{A}}$ и $\tilde{D}_{\text{B}}$, вызывающих заданный эффект поражения
Условный динамический	$P_{\text{уд}} = \int_0^\infty \int_0^\infty P\left(D_A, D_{A,50}, D_B, D_{B,50}\right) \varphi(D_A, D_B) dD_A dD_B$	Токсодозы D_{A} и D_{B} в заданной точке x, y
Безусловный статический	$P_{\text{бс}} = \int_0^\infty \int_0^\infty \left(1 - \int_{D_A}^\infty \int_{D_B}^\infty \varphi\left(\tilde{D}_A, D_{A,50}, \tilde{D}_B, D_{B,50}\right) d\tilde{D}_A d\tilde{D}_B \right) \varphi(D_{A,50}, D_{B,50}) dD_{A,50} dD_{B,50}$	Оценки величин D_{50} и t_{50}
Безусловный динамический	$P_{\text{бд}} = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty P_{\text{ус}}\left(D_A, D_{A,50}, D_B, D_{B,50}\right) \varphi(D_A, D_B) \varphi(D_{A,50}, D_{B,50}) dD_A dD_B dD_{A,50} dD_{B,50}$	Токсодозы D_{A} и D_{B} в заданной точке x, y; оценки величин D_{50} и t_{50}

личинами или функциями, что объясняется следующими причинами:

математические модели, описывающие формирование полей поражающих факторов по существу описывают их математические ожидания, например поле экспозиционных доз при авариях на химически опасных объектах. В реальных условиях протекания аварий и формирования полей поражающих факторов последние являются случайными, что необходимо учитывать при оценке пространственных и временных показателей опасности техногенных аварий;

параметры факторных и факторно-временных законов поражения [4, 5], описывающих вероятность наступления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести к заданному моменту времени в зависимости от величины действующего поражающего фактора, с одной стороны, — это параметрами генеральной совокупности, а с другой, — их численные значения находят только из результатов специально поставленных экспериментов, например токсикологических. Поэтому численные значения параметров — лишь оценка параметров генеральной совокупности и, как всякая оценка, являются непрерывными случайными величинами.

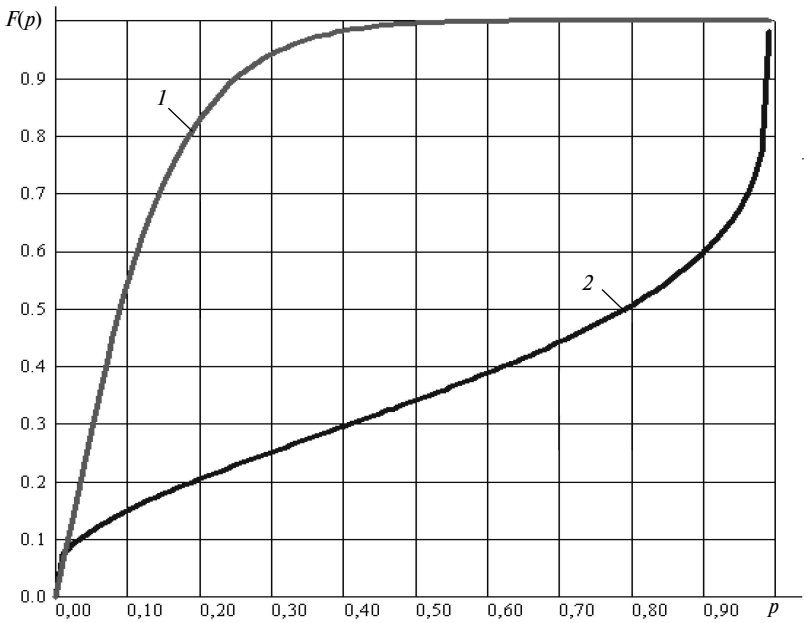
В связи с этим применительно к решению проблемы детерминизации в зависимости от того, какие случайные факторы учитываются, обоснованы различные виды факторных, факторно-временных законов поражения, а также двумерных факторных законов поражения при комбинированном действии двух различных поражающих факторов [3–5]. Они позволяют оценивать пространственные и временные показатели опасности техногенных аварий, от простейших до наиболее полных и интегральных, на уровне их условных и безусловных математических ожиданий.

Различные виды этих законов поражения и их смысл представлены в таблице. Конкретные аналитические представления законов и их параметры наиболее полно изложены в [4].

Помимо этого, используя теорию функций двух случайных аргументов, был впервые получен закон распределения случайной вероятности поражения не ниже заданной степени тяжести в точке, который имеет следующий вид [1, 4]:

$$F(p)=\frac{1}{2}\left\{1+\operatorname{erf}\left[\sqrt{k_p}\left(\operatorname{arcerf}(2p-1)-\right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left.-\operatorname{arcerf}(2p_e-1)\right)\right]\right\}, \qquad (6)$$

где $\sqrt{k_P}$, p_e — параметры закона распределения.



Принципиальный вид функции $F(p)$:
1 — $p_e = 0{,}1$; $\sqrt{k_P} = 2$; *2* — $p_e = 2$; $\sqrt{k_P} = 0{,}5$

График функции распределения случайной вероятности поражения не ниже заданной степени тяжести показан на рисунке.

Закон (6) позволяет получать гарантированные оценки вероятности поражения в различных точках относительно аварийного объекта.

Различные аспекты рассматриваемых в статье вопросов нашли отражение в лекциях, которые на протяжении ряда лет читались авторами в различных вузах страны (Военная академия химической защиты, Военная академия связи, МГТУ им. Н.Э. Баумана, СПбГПУ).

В результате проведенных теоретических исследований к настоящему времени сложились предпосылки для разработки принципиально новых методов и методик оценки опасности техногенных аварий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефимов, В.Ф.** Актуальные проблемы оценки пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий [Текст] / В.Ф. Ефимов, А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: Сб. докладов и выступлений на VIII научно-практ. конф. 8–10 октября 2008 7. — СПб.: Изд-во УГПС МЧС России, 2009.— С. 199–210.

2. **Ефимов, В.Ф.** К вопросу о показателях опасности техногенных аварий [Текст] / В.Ф. Ефимов, А.М. Кармишин, Л.П. Титоренко // Матер. Всероссийской (межведомственной) конференции (24 декабря 2003 года).— М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – С. 76–88.

3. **Адамова, Е.О.** Временные характеристики поражающего действия аварий на объектах хранения и уничтожения химического оружия [Текст] / Е.О. Адамова, А.М. Кармишин, В.А. Киреев / ВА РХБ защиты // НТС.— 2006, № 1 (45). 14–18 с.

4. **Кармишин, А.М.** Математические методы фармакологии, токсикологии и радиобиологии [Текст]: Монография. Изд. 2-е, перераб. и доп. / А.М. Кармишин, В.А. Киреев [и др.].— М.: ООО «АПР», 2011. — 330 с.

5. **Кармишин, А.М.** Теоретическое описание комбинированного действия АХОВ [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин, В.Ф. Ефимов // Матер. V научно-практ. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». 16–16 декабря 2005 г.— М.: ООО «Рекламно-издательская фирма МТП-инвест», 2006.— С. 379–392.

ГУМЕНЮК Василий Иванович — *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 248-91-93
kaf-uzchs@mail.ru

КАРМИШИН Александр Михайлович — *доктор технических наук профессор кафедры экологии и промышленной безопасности Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.*
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, Россия
(499) 263-63-91

КИРЕЕВ Владимир Анатольевич — *доктор технических наук профессор Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.*
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, Россия
(499) 263-63-91

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 614:627.8

А.Ю. Туманов

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО ОЦЕНКЕ РИСКА АВАРИЙ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ

A.Yu. Tumanov

DEVELOPMENT OF A SYSTEM TO SUPPORT A DECISION TO ASSESS THE RISK OF ACCIDENTS ON POTENTIALLY HAZARDOUS INSTALLATIONS

В рамках решения задачи предотвращения и прогнозирования неблагоприятных событий (аварии, происшествия, инциденты, катастрофы), решаемой с применением средств автоматизации, разработана методика формирования модели системы поддержки принятия управленческих решений по оцениванию риска аварий, основанная на структурировании и оценке внутренних информационных потоков, классификации факторов риска, их вероятностей и возможных последствий аварии на потенциально-опасных объектах энергетики.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ. ОПАСНЫЙ ОБЪЕКТ ЭНЕРГЕТИКИ. БАЗА ДАННЫХ. ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА.

The task of preventing and predicting adverse events (accidents, incidents, accidents, catastrophes) problem in the application of automation, a method of forming a model of managerial decision-support system to assess the risk of accidents, based on the structuring and evaluation of internal information flows, risk classification, their probability and potential consequences of potentially hazardous installations.

DECISION SUPPORT SYSTEM. A DANGEROUS ENERGY OBJECT. DATABASE. EXPERT SYSTEM.

Была поставлена цель разработать теоретические и методологические положения для информационно-управленческой модели системы поддержки принятия управленческих решений по оценке риска аварий на потенциально опасных объектах энергетики. Достижение указанной цели исследователь осуществил изучая и анализируя конкретные информационные технологии, основные тенденций развития предприятий энергетики и влияние информационных систем на эффективность деятельности указанных организаций, а также системы поддержки принятия управленческих решений.

В соответствии с указанной целью были решены следующие основные задачи:

проведен анализ представленных на информационном рынке России программных продуктов, автоматизирующих отдельные процессы управления, и выделены категории продуктов, используемые при оценке риска аварий на потенциально опасных объектах энергетических предприятий;

исследованы особенности управления энергетическими предприятиями в условиях ЧС;

выполнен анализ основных проблем, возникающих при применении различных информационных технологий в энергетической отрасли;

разработана методика формирования модели системы поддержки принятия управленческих решений по оценке риска аварий для энергетических предприятий, основанная на структурировании и оценке внутренних информационных потоков, классификации факторов риска, их вероятностей и возможных последствий аварии для различных объектов и субъектов экономики;

проведена оценка эффективности внедрения модели на предприятиях энергетической отрасли.

Объектом этого исследования были опасные объекты энергетики (ООЭ). В качестве ООЭ для примера выбрана тепловая электростанция (ТЭЦ).

Предмет исследования — процессы оценки риска аварий на потенциально-опасных объектах энергетических предприятий, обеспечивающие реализацию процессов принятия решений в системе управления ООЭ.

Основные методы исследования: экономико-математическое моделирование, системный подход, теория принятия решений, методы оптимизации, теория информации, теория вероятностей.

Основные результаты:

методика оценки риска аварии на ООЭ с учетом внутренних и внешних факторов, являющаяся основой формирования системы поддержки принятия решений на энергетическом предприятии;

методика оценки эффективности информационной поддержки принимаемого решения;

принципы и методы работы системы поддержки принятия решений на тепловых электростанциях;

методика внедрения модели информационной системы в информационное пространство энергетических предприятий;

аппаратно-программный комплекс оценки риска аварии ООЭ, включающий в себя базу данных ООЭ региона и экспертную систему.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

сформулированы основные требования к функционированию систем поддержки принятия управленческих решений на опасных объектах на примере энергетических предприятий и предложена модель системы поддержки принятия управленческих решений, отличающаяся от существующих применением структурированных и оцененных факторов риска аварии на опасном объекте, их вероятностей проявления, учетом этапов жизненного цикла ЧС;

введено понятие «жизненный цикл» и определены этапы развития ЧС на энергетических предприятиях;

введен параметр оценки эффективности разрабатываемых средств поддержки принимаемого решения на энергетических предприятиях и оценен вклад его составляющих;

на основе проведенного исследования разработаны рекомендации по внедрению указанной модели.

Практическая значимость результатов работы заключается в предоставлении персоналу управления тепловых электростанций методологии создания инструмента оперативного анализа информационных потоков по оценке риска, связанных с возможной аварией, и моделирования на их основе принимаемых решений, поддержания максимальной эффективности деятельности энергетического предприятия в различные периоды с учетом возможности ЧС.

Полученные результаты могут стать отправной точкой для дальнейшей разработки ряда направлений, связанных с построением систем поддержки деятельности аппарата управления и корпоративных систем предприятий энергетики. Предложенные рекомендации также позволят выбрать пути использования предлагаемых продуктов на рынке информационных систем.

Основные теоретические положения и выводы могут быть использованы в курсе «Экономика и менеджмент безопасности», при подготовке специалистов в области экономики энергетики (применение информационных технологий и построение систем поддержки принятия управленческих решений для предприятий энергетической отрасли), а также в научно-исследовательских разработках по проблемам применения информационных технологий в области энергетики.

Результаты исследования использованы при разработке курсов бакалаврских и магистерских программ «Управление и оценка риска», «Оценка эффективности систем безопасности в чрезвычайных ситуациях» для студентов кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях факультета комплексной безопасности (института военно-технического образования и безопасности) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Основные компоненты информационной системы поддержки принятия управленческих решений

Автоматизированные информационные системы поддержки принятия управленческих решений позволяют менеджерам оперировать

с большим объемом информации, заложенным в базах данных (знаний), исследовать различные ситуации, выдавать прогнозные решения, что в обычном режиме работы менеджера могло остаться незамеченным. Это не значит, что менеджер устраняется от процесса принятия решения, но он использует элементы искусственного интеллекта, снижающего риск принятия «неправильных» решений.

Информационная система поддержки принятия управленческих решений представляет собой частный случай информационных систем управления предприятиями. В общем смысле информационную систему можно рассматривать как совокупность процедур и ресурсов, с помощью которых собирается, трансформируется и распространяется информация. Информационная система управления представляет собой совокупность аппаратных, программных и организационных средств, которые позволяют удовлетворить потребность управленцев всех уровней в обработке информации.

В работе [1] представлены основные компоненты информационной системы поддержки принятия управленческих решений:

1. Система управления данными, включающая в себя базы данных (хранилище информации), базы знаний или правил (набор правил, в соответствии с которыми осуществляется анализ и преобразование информации для подготовки принятия решений), базы прецедентов (хранилище ранее имевших место случаев преобразования информации).

2. Модельная база, содержащая финансовые статистические и управленческие модели, обеспечивающие аналитические возможности системы.

3. Поддержка и обработка модельной базы аналогично управлению базами данных.

4. Диалоговая подсистема, обеспечивающая интерфейс пользователя.

При построении системы необходимо учитывать информационные потоки, включающие директивные, нормативные, плановые, учетно-отчетные, социальные и прочие источники информации.

Как указывалось выше, внедрение информационной системы поддержки принятия управленческих решений позволяет повысить эффективность системы управления. Это может быть достигнуто путем обеспечения следующих функций и получения ряда выгод (эффектов):

способности поддерживать решения сложных проблем;

быстрой реакции на возникновение неожиданных ситуаций (снижение времени на обработку поступающей информации);

возможности оценки нескольких путей решения проблемы;

улучшения контроля за исполнением решений;

снижения затрат;

повышения объективности принимаемых решений;

увеличения эффективности управления за счет улучшения качества планирования и анализа деятельности.

Анализ существующих СППР и информационных систем

Проведенный анализ выявил, что возникшие в 1970-х годах информационные системы для принятия управленческих решений появились в тот момент, когда основное внимание уделялось снабжению информацией и поддержке эффективных управленческих решений. Сама концепция этого направления возникла в 1960-х годах. В нашей стране такие системы известны под названием АСУ и использовали достижения в области обработки данных в управлении, теории систем и компьютерных технологий. Концепция получила широкое применение, так как определяет именно управленческий аспект в информационных системах. Ее главная цель — поддержка принятия управленческих решений и формулирование того, что основа системы — использование конкретных компьютерных программ в организациях, которые взаимосвязаны и интегрированы.

Основные проблемные области исследования при создании СППР согласно работе [2]:

1. *Управление региональным риском*. При оценке безопасности необходимо учитывать риск от всех технологий, размещенных в рамках исследуемого региона (страны). Концентрация опасных производств на небольшой территории приводит к значительному возрастанию опасности в случае наступления аварии. В ряде стран (например, Нидерланды, Франция) приняты законодательные меры, направленные на регули-

рование использования новых технологий. В Нидерландах построены карты риска от всех существующих потенциально опасных предприятий. Определены стандарты, которые должны соблюдать все предприятия, а там, где требуется, и промежуточные стандарты. Решение о постройке нового предприятия принимается лишь после проведения анализа риска, при этом выбор площадки для его строительства определяется уровнями риска от него и близостью населенных пунктов. Аналогично при перевозке опасных веществ рассчитываются маршруты исходя из минимума возможного риска.

В Италии создан объединенный центр по управлению риском стран-членов ЕЭС. В его функции входят сбор данных об используемых технологиях, разработка мер безопасности, информирование населения, осуществление функций контроля. Для проведения аналитических исследований Центр создает банк данных по всем крупным авариям.

Вопросами прогнозирования ЧС и созданием СППР занимается ряд организаций. Так ВНИИ ГОЧС в кооперации с Центром исследования экстремальных ситуаций и Военно-инженерным университетом уже более десяти лет создает специализированную геоинформационную систему (ГИС) «Экстремум» — комплексное программное средство, включающее картографические и атрибутивные базы данных, модели для прогнозирования ЧС и их последствий, сценарии реагирования при землетрясениях, природных пожарах, наводнениях, техногенных катастрофах [3].

ГИС работает в двух режимах — исследовательском и оперативном. Первый предназначен для решения научно-практических задач по заблаговременной оценке рисков, изучения различных факторов, влияющих на уровень риска, оценки эффективности мероприятий по его снижению и управлению им. Оперативный режим служит для определения эффективных мероприятий по немедленному реагированию на ЧС.

На основе разработанных математических моделей созданы методики прогнозирования ЧС, планирования мероприятий по смягчению их последствий и оперативному реагированию на них. Эти методики позволяют получать:

поля поражающих факторов в случае аварий на опасных объектах;

законы разрушения зданий различных типов, характерных для рассматриваемого региона;

законы поражения людей, учитывающие специфику территории;

оценки последствий природных и техногенных процессов при аварии и разрушении гидротехнических сооружений;

оценки последствий на пожаро-, взрыво-, радиационно- и химически опасных объектах;

оценки риска опасных природных и техногенных процессов.

Блок программ, разработанных в среде MS Access на языке Visual Basic, позволяет оценивать последствия и индивидуальные риски при наводнениях, пожарах в случае аварий на опасных объектах. Модели внутри блока подразделяются на следующие группы:

модели воздействий;

модели, описывающие сопротивление объектов воздействию;

модели оценки риска.

Комплексное применение этих моделей дает возможность оценить последствия первичного и вторичного воздействий опасных факторов, включая медицинскую, инженерную, пожарную и химическую обстановку, а также спрогнозировать индивидуальный риск населения.

Для прогнозирования рисков от лесных пожаров и наводнений в состав СППР включен отдельный модуль. Внушительная площадь региона, где возможны катастрофы (80 процентов территории России покрыто лесами, примерно столько же приходится на бассейны крупнейших рек Европы и Азии), и пространственная неопределенность мест возникновения очагов влияют на состав и объем информации, хранимой в базах данных ГИС. В них включена информация о 2500 пунктах наблюдения за пожарной обстановкой и о более чем 3000 водомерных постов на территории России. Исходными данными для оценки рисков служат результаты метеорологических прогнозов и наблюдений за изменением уровня воды в реках и за параметрами, характеризующими пожарную обстановку в лесных массивах (температура, влажность, количество дней после дождя). Результатом расчета являются показатели зонирования территории по степени опасности за определенный

промежуток времени и показатели индивидуального риска, которые оформляются в виде тематической карты и пояснительной записки.

Донским экологическим центром разработаны СППР представляющие собой базы данных «Потенциально опасные объекты», «Аварии» и «Загрязнение нефтепродуктами» и ряд других.

В ходе анализа выявлено, что база данных «Потенциально опасные объекты» предназначена для хранения и структурирования необходимых для экологического контроля данных по потенциально опасным объектам и включает в себя следующие элементы:

1) характеристики потенциально опасных объектов;

2) утвержденный порядок их экологического контроля;

3) схемы оповещения и порядок действия групп ликвидации аварий;

4) порядок взаимодействия с подразделениями МЧС России;

5) место дислокации штаба по ликвидации аварий на объекте;

6) наличие в штабе моделей развития аварийных ситуаций и распространения загрязняющих веществ при данных метеорологических условиях в данной конкретной местности;

7) характеристики моделей возможных последствий загрязнения объектов;

8) задачи восстановления ОПС после ликвидации последствий аварий и перечень возможных типовых мероприятий, которые можно провести силами личного состава объекта под контролем эколога предприятия или организации, на территории которой находится данный объект;

9) количество и типы потенциальных источников радиационного загрязнения на объектах;

10) имеющиеся случаи нарушения правил их эксплуатации и утилизации;

11) наличие признаков профессионального заболевания у личного состава объекта, обслуживающих эти источники;

12) количество и типы потенциальных источников химического загрязнения на объектах;

13) имеющиеся случаи нарушения правил их эксплуатации и наличие предприятий по утилизации таких источников;

14) наличие на этих объектах моделей распространения ОВ (СДЯВ) в аварийных ситуациях;

15) количество и типы потенциально опасных объектов народного хозяйства, деятельность которых отрицательно сказывается на состоянии качества ОПС.

База данных «Аварии» предназначена для хранения и анализа данных, необходимых для эффективного проведения мероприятий по ликвидации аварий и их последствий.

Данные о происшедших аварийных сбросах на природоохранных и потенциально опасных сооружениях за последние пять лет включают в себя следующие элементы:

1) причины и последствия аварий;

2) прогноз возможных аварийных ситуаций на этих сооружениях, меры их предупреждения силами предприятия или организации с учетом привлечения сил и средств МЧС России;

3) возможные экологические последствия этих аварий и ущерб окружающей природной среде (ОПС).

База данных «Загрязнение нефтепродуктами» предназначена для хранения и анализа данных, необходимых для учета случаев загрязнения окружающей природной среды и мероприятий по ликвидации их последствий. Она включает в себя:

1) количество и типы складов хранения нефтепродуктов на территории предприятия или организации;

2) состояние складов хранения нефтепродуктов;

3) имевшиеся случаи загрязнения территорий нефтепродуктами за последние пять лет;

4) принятые меры по ликвидации загрязнения территорий нефтепродуктами;

5) предложения по устранению последствий загрязнения территорий.

Предлагаемая СППР

Под системой поддержки принятия решений (СППР) понимается информационная система, предназначенная для формализации и актуализации слабоструктурированных и неструктурированных задач планирования, прогнозирования и управления, максимально приспособленных для адекватной оценки повседневных управленческих проблем и используемых в качестве инструмента экспертами и системными аналитиками.

Общий алгоритм поддержки принятия решений, состоящий из этапов, наиболее удобно

представить в виде IDEFO-диаграммы, приведенной на рис. 1 [4]:

Рассмотренная иерархическая последовательность показывает, что переход к последующему этапу без реализации предыдущего затруднен, но возможны итерации, т. е. повторения несколько раз одного и того же этапа или совокупности этапов для достижения наиболее эффективного результата.

Рассмотрим функциональную схему системы поддержки принятия решений для реализации широкого круга задач**.** Анализ классической схемы, известной из теории принятия решений, для реализации СППР в рамках одной предметной области выявил необходимость структуризации, оптимизации и актуализации существующих алгоритмов и методов, предназначенных для решения задач в управленческой деятельности.

При необходимости привлечения больших объемов информации в классической схеме поддержки принятия решений необходимо использовать базы данных и базы знаний, а оптимальное применение методов и правил формирования системы критериев, генерации альтернатив, выбора и анализа альтернатив позволит интеллектуализировать процесс принятия решений.

За основу построения СППР оценки риска аварий на ООЭ взята общая функциональная схема СППР, отвечающая современным требованиям IT-технологий (рис. 2), разработанная в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований по теме «Разработка теоретических основ и построение интеллектуальных систем мониторинга, анализа и поддержки принятия политических, социально-экономических и технологических решений региональ-

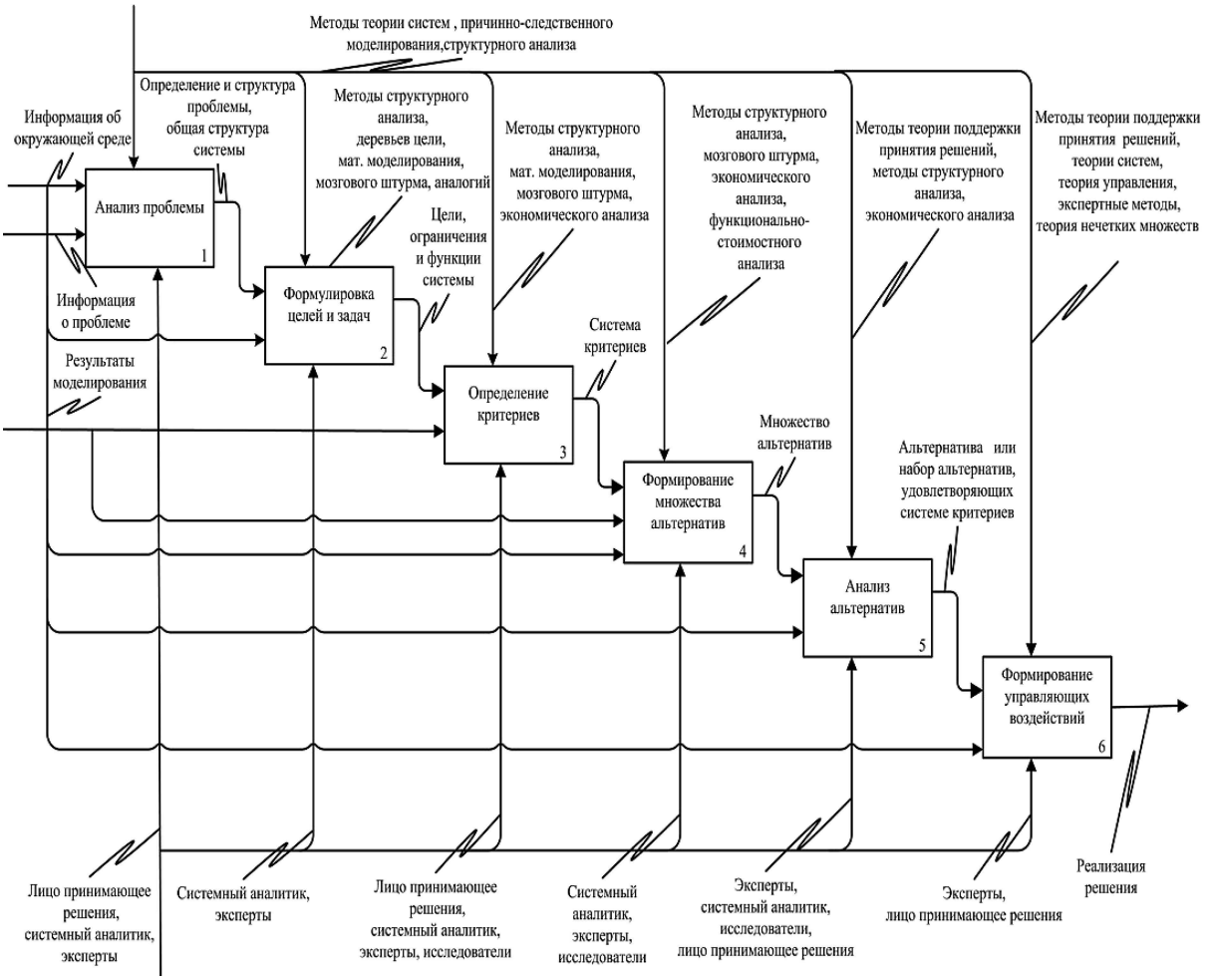


Рис. 1. Алгоритм поддержки принятия решений [4]

ного уровня для ситуационных центров органов власти». [5]. В этой работе функциональная схема системы поддержки принятия решений построена таким образом, что при рассмотрении задач, относящихся к различным предметным областям, система перенастраивается на конкретную проблемную ситуацию. Возможность организации БД и БЗ больших объемов позволяет использовать накопленную информацию при решении различных задач с учетом методов генерации решений, формирования системы критериев и выбора решений в зависимости от предметной области проблемы.

Реализация СППР в рамках приведенной принципиальной схемы дает возможность расширять количество и круг задач при условии программной модернизации СППР и наполнения ее баз данных и баз знаний. Однако такую сложную систему должны поддерживать специалисты, которые в зависимости от назначения структурных элементов условно разбиты на группы в соответствии с функциональными обязанностями: системные аналитики, эксперты, исследователи и лица, принимающие решения.

При проектировании, построении и программной реализации системы для назначения структурных элементов и функциональных задач пользователей СППР необходима ее ориентация на поддержку принятия решений в рамках определенной предметной области или нескольких областей, а также различного класса управленческих задач в соответствии с этими предметными областями.

Согласно принципиальной схеме одним из элементов СППР является БД (БЗ). Адаптируем представленную принципиальную функцио-

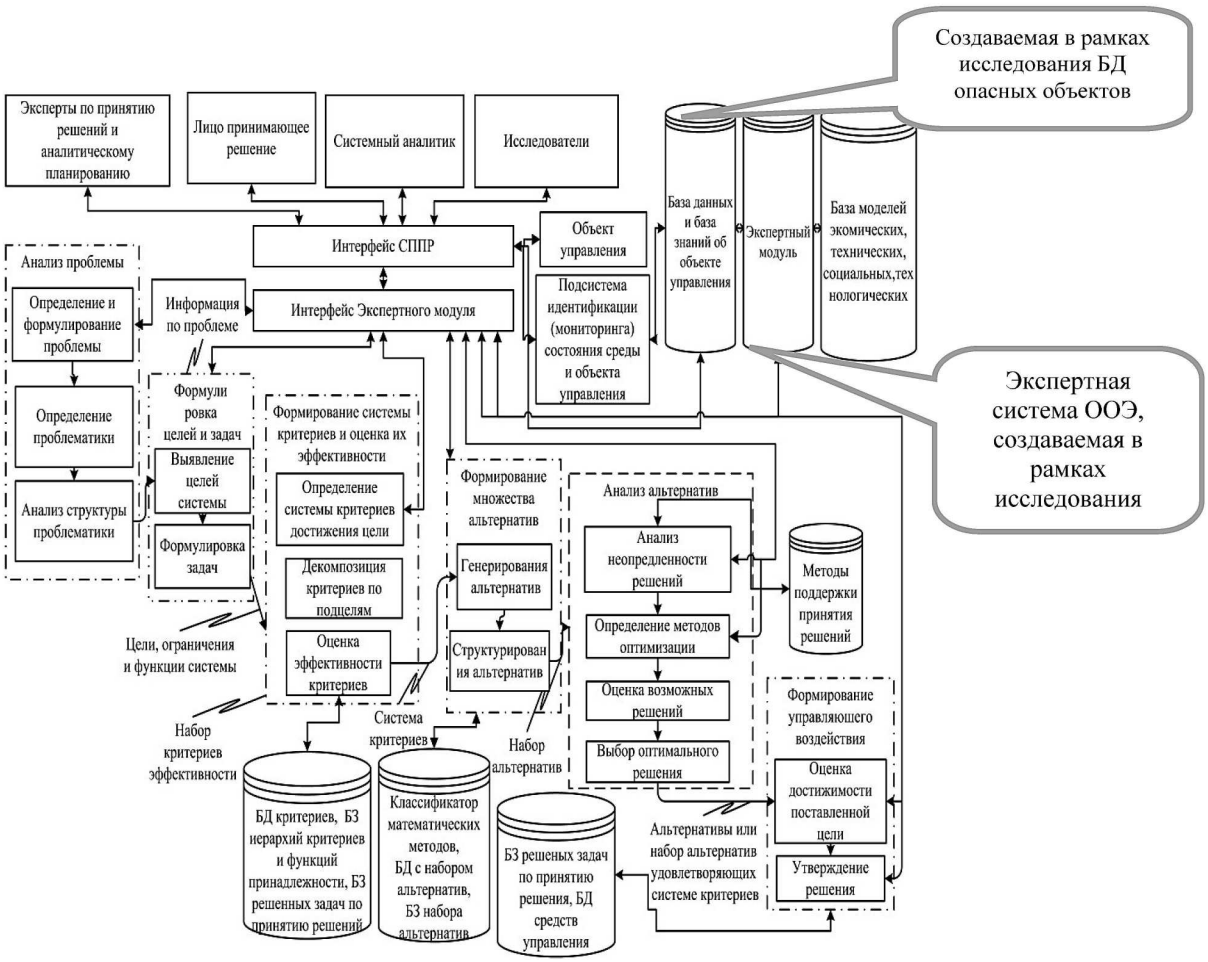


Рис. 2. Функциональная схема СППР [5], взятая за основу

нальную модель СППР для предметной области, связанной с безопасностью в ЧС. В ходе исследования разработан прототип базы данных «Опасные объекты энергетики», которая предназначена для хранения и структурирования данных, необходимых для оценки риска аварии на потенциально опасных объектах топливно-энергетического комплекса региона России и включает в себя следующие элементы:

1) виды и характеристика потенциально опасных объектов;

2) расчетные модели развития аварийных ситуаций и распространения загрязняющих веществ при данных метеорологических условиях в данной конкретной местности;

3) характеристики моделей возможных последствий загрязнения объектов;

4) типы и признаки потенциальных источников опасности на объектах;

5) текущее состояние безопасности ООЭ.

Интерфейс программной реализации БД «Опасные объекты энергетики», созданной в среде MS Access 2003 на языке Visual Basic, представлен на рис. 3.

Еще один из элементов создаваемой СППР ОРООЭ — экспертная система (ЭС), реализованная в виде компьютерной программы «Экспертный модуль».

Экспертные системы в зависимости от назначения подразделяются на несколько видов. Для случая идентификации факторов риска и оценки апостериорных вероятностей риска рекомендуется создать собственную *идентификационно-диагностическую экспертную* систему с машиной логического вывода вероятностного типа (байесовская система) и базу знаний по оценке безопасности объектов энергетики, реализованную в виде компьютерной программы.

Было принято решение о разработке специализированного для данной ЭС программного обеспечения.

Для поддержки принятия решений на этапе идентификации опасностей промышленных объектов, т. е. для определения перечня опасных устройств и возможных сценариев развития аварий, а также для решения слабоструктурируемой задачи оценки риска предлагается создать и применять экспертную систему на основе базы знаний факторов опасности (риска).

В работе [6] дано краткое описание простой ЭС, использующей байесовскую систему логического вывода. Она предназначена для проведения консультации с пользователем с целью определения вероятностей возможных исходов и использует для этого оценку правдоподобности

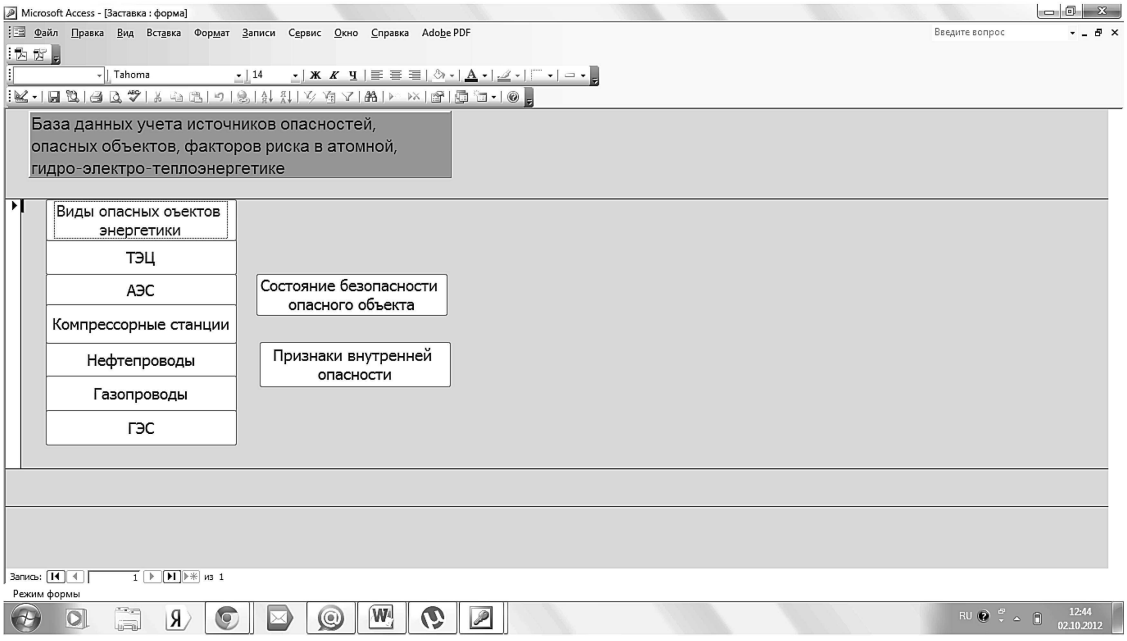


Рис. 3. Внешний вид главного окна программы БД «Опасные объекты энергетики»

некоторых предпосылок, получаемую от пользователя. ЭС в данном случае выступает в роли эксперта, который задает уточняющие вопросы пользователю относительно факторов риска и на основе полученных дополнительных сведений выдает результат консультации. Причем желательна минимизация количества задаваемых вопросов, для чего слоедует выявить и задавать самые важные вопросы, от ответа на которые в большей степени зависит окончательное установление результата. Именно так и поступает данная ЭС. Она запрашивает у пользователя оценку истинности самого важного *свидетельства*, на основе ответа корректирует вероятности *исходов* и переходит к следующему свидетельству, выбрав снова самое актуальное. Таким образом, достигается наискорейшее получение результата при минимальном количестве запросов.

Использование байесовской системы логического вывода означает, что информация, обрабатываемая ЭС, не является абсолютно точной, а носит вероятностный характер. Пользователь не обязательно должен быть уверен в абсолютной истинности или ложности свидетельства, он может отвечать на запросы системы с какой-то степенью уверенности. В свою очередь ЭС выдает результаты консультации в виде *вероятностей* наступления исходов. Под исходами в зависимости от настроек ЭС могут пониматься опасности, причины опасностей (факторы риска), сценарии развития аварий на опасном объекте и др.

ЭС представлена в виде компьютерной программы, в которой и проводится консультация. На рис. 4 показан фрагмент байесовского логического вывода, в котором свидетельства (вопросы уточняющего характера) — E_i, а исходы (факторы риска) — C_j. Величина апостериорной вероятности по этапу жизненного цикла проекта $P(C)$ находится как произведение вероятностей исходов, если эти факторы статистически независимы.

Рассмотрим, как в ЭС представлены результаты консультации. Целью консультации является определение *апостериорных вероятностей возможных исходов*. Список исходов с указанием текущих значений вероятностей показан в левой части верхней половины окна программы. Ширину этой области можно увеличить или умень-

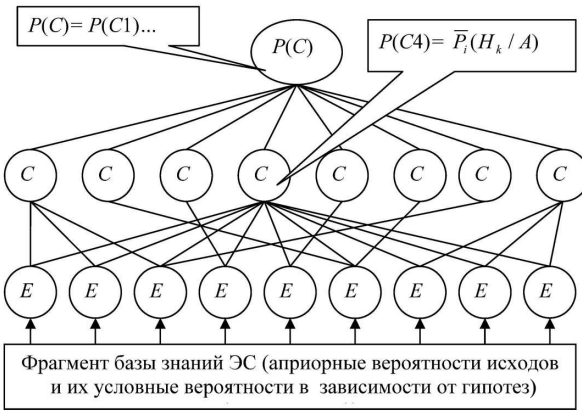


Рис. 4. Фрагмент байесовского логического вывода для ЭС

шить, передвинув разделитель, отделяющий ее от области обработанных свидетельств.

Для более удобного представления результатов их можно упорядочить либо по названиям исходов (в алфавитном порядке), либо по значениям текущих вероятностей. Вероятности исходов могут быть выражены в процентах. Здесь же можно сделать выбор относительно классификации результатов на существенные и несущественные (выделение цветом).

Имеется возможность следить за вероятностью конкретного исхода, если выделить его в списке, — теперь он всегда будет виден в окне (при этом результаты должны быть упорядочены в алфавитном порядке). Если же результаты упорядочены по вероятностям, то можно выбрать нижнюю строку списка, чтобы в поле зрения всегда был наименее вероятный исход (фактор риска ИП).

После того, как будет обработано последнее значимое свидетельство, ЭС подведет итог, и вероятности исходов в списке результатов примут окончательные значения. Теперь вы можете сделать вывод о возможности наступления интересующего вас исхода или просто прочесть название наиболее вероятного из возможных исходов. Кроме того, экспертная система выдает результаты консультации в виде столбчатой диаграммы, что позволяет наглядно показать ключевые факторы риска ($P_i(H_k / A) > P_{i\,\text{кр}}$).

В случае с ООЭ необходимо узнать какова вероятность возникновения и наступления того или иного исхода при изучении влияния того или иного фактора риска на опасный объект.

Кроме того, для выяснения вероятностей наступления того или иного исхода, в данном случае фактора риска, можно оценить влияние этих факторов в разных условиях. Для этого пользователи могут провести консультации с ЭС и на основе полученных результатов оценить ключевые факторы риска, после чего сделать предварительные выводы о безопасности объекта энергетики. Применение ЭС автоматизирует и укорачивает процесс выявления влияния факторов риска на ООЭ и производит их ранжирование по степени вероятности и важности, а также по величине предполагаемых потерь от их реализации. При этом выявляются ключевые факторы риска.

Наибольшую сложность при разработке ЭС вызвало создание ее БЗ на основе классификатора факторов риска объекта и присвоение факторам риска величин априорных вероятностей и условных вероятностей в зависимости от степени уверенности в том или ином утверждении. Надо отметить следующее обстоятельство: условные вероятности наступления того или иного элементарного события (фактор риска), задаваемые как величины $P_{\text{у}}, P_{\text{п}}$, являются основанием для проведения расчета апостериорной вероятности наступления нежелательного события согласно теореме Байеса.

Ниже приведено описание базы знаний опасностей и факторов риска ООЭ. Для подтверждения обоснованности предложенной базы знаний было проведено тестирование ЭС на нескольких опасных объектах, из чего было сделано заключение о возможности применения БЗ в оценке других опасных объектов энергетики. Конечно, БЗ не лишена определенных недостатков и, безусловно, необходимо проводить работу по ее улучшению по мере использования для большого числа опасных объектов, что даст необходимые статистические данные. Но и в первоначально созданном виде БЗ и использование ее для определения вероятностей факторов риска и сценариев происшествий является мощным качественным средством и необходимой предпосылкой создания информационно-управленческой системы безопасности опасных объектов энергетики. На рис. 5 представлен общий вид формы «Экспертный модуль» .

Основные результаты исследования

Разработана база данных «Опасные объекты энергетики» предназначенная для хранения и структурирования данных, необходимых для оценки риска аварии на потенциально-опасных объектах топливно-энергетического комплекса региона России.

Разработан исследовательский прототип экспертной системы поддержки принятия решений на этапе идентификации опасностей,

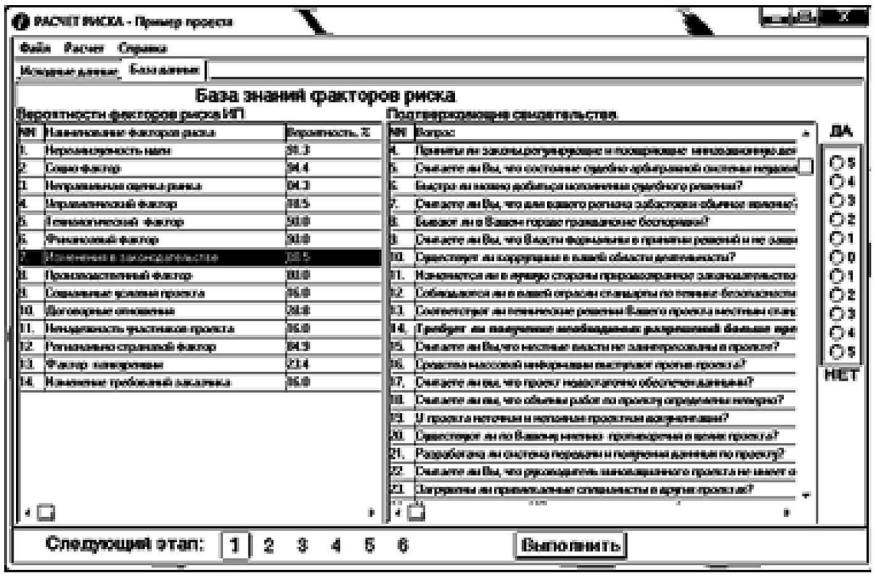


Рис. 5. Общий вид формы «Экспертный модуль»

позволяющий проводить вычислительные эксперименты по реализации сценариев развития аварии на опасных объектах. Прототип создан на основе разработанной модели представления базы знаний об источниках опасностей, угрозах, возможных сценариях развития аварий и реализован в специализированной оболочке на программной платформе «ДЕЛЬФИ-6».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вылгина, Ю.В.** Разработка модели системы поддержки принятия решений: На примере тепловых электростанций [Текст]: дисс. канд. экон. наук и автореферат.— 2013.

2. **Ларичев, О.И.** Методологические проблемы анализа риска и безопасности использования новых технологий [Текст] / О.И. Ларичев, А.И. Мечитов // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник.— 1987. № 19. / Под ред. Д.М. Гвишиани, В.Н. Садовского.— М.: Наука, 1988.— С. 26–44.

3. **Шахраманьян, М.** ГИС для прогнозирования чрезвычайных ситуаций [Текст] / М. Шахраманьян // «Компьютерра».— № 47 от 10 декабря 2001 года.

4. **Симанков, В.С.** Автоматизация системных исследований [Текст] / В.С. Симанков. В.С. Симанков.— Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2002.— 376 с.

5. **Симанков, В.С.** Методологические аспекты построения систем поддержки и принятия решений [Текст] / В.С. Симанков, С.Н. Владимиров, А.О. Денисенко, А.Н. Черкасов.— Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2008.

6. **Туманов, А.Ю.** Модели и алгоритмы представления знаний для прогнозирования опасностей объектов техносферы и защиты от угроз в энергетике [Текст] / А.Ю. Туманов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 4(135).— С. 263–272.

ТУМАНОВ Александр Юрьевич — *доцент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
toumanov@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 378.416

А.В. Речинский, В.И. Никифоров, Л.В. Черненькая

РАЗРАБОТКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА КАК РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА 2013–2020 ГОДЫ

A.V. Rechinskii, V.I. Nikiforov, L.V. Chernenkaya

THE DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL STANDARDS, SAINT-PETERSBURG STATE POLYTECHNIC UNIVERSITY AS THE IMPLEMENTATION OF THE PROGRAM OF DEVELOPMENT OF RUSSIAN EDUCATION FOR THE YEARS 2013–2020

Рассмотрены направления развития высшего профессионального образования России и задачи Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Представлены основы и результаты создания самостоятельно разработанных образовательных стандартов СПбГПУ.

ОБРАЗОВАНИЕ. БАКАЛАВРИАТ. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ СТАНДАРТ СПБГПУ. ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ СТАНДАРТА.

Directions of evolution of High professional education in Russia and tasks for Saint-Petersburg State Polytechnic University are considered. Basis and results of development of self-design educational standards at StPbSPU are introduced.

EDUCATION. BACHELOR'S STUDIES. EDICATIONAL STANDARD OF StPbSPU. PEDAGOGICAL DACKGROUND OF STANDARD.

Реформа образовательной системы России вступила в новый период. Цели и задачи этого периода определяются в первую очередь утвержденным Государственной Думой Законом об образовании в Российской Федерации [4] и Государственной программой Российской Федерации «Развитие образования» на 2013–2020 годы (далее — Программа «Развитие образования») [2].

Приведем ключевые, отличительные положения государственной программы «Развитие образования»:

предпринят ряд шагов по модернизации профессионального образования, повышению его качества, интеграции российского профессионального образования в международное образовательное пространство. Речь идет о вхождении России в Болонский процесс, повышении гибкости образовательных программ, преодолении ранней узкой специализации, внедрении федеральных государственных стандартов профессионального образования, предусматривающих большую самостоятельность образовательных учреждений, возможность индивидуализации подготовки студентов;

для интенсификации развития всей системы высшего образования России выделена катего-

рия ведущих вузов, в которую входят Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова и СанктПетербургский государственный университет с особым статусом «уникальных научно-образовательных комплексов, старейших вузов страны, имеющих огромное значение для развития российского общества», а также федеральные и национальные исследовательские университеты, разработавшие и реализующие собственные программы развития;

в целом в масштабах страны обеспечен высокий уровень доступности образования на всех уровнях [2].

Вместе с тем констатируется, что многие федеральные инициативы и инновации так и не вошли в повседневную практику вузов, не стали основами деятельности образовательных учреждений высшего профессионального образования (ВПО). В документе определены конкретные признаки такого расхождения, а также обусловливающие его причины и факторы, а именно:

по международному рейтингу университетов в перечне ведущих международных высших учебных заведений нет российских вузов;

структура профессионального образования в России за последние 10–15 лет оказалась неоправданно смещена в сторону высшего образования. Коэффициент приема в вузы выпускников средних школ в 2010 году превысил 90 %. Высшее образование стало социальным императивом и обязательным условием любой карьеры. Сложилась ситуация, когда работодатели не могут найти квалифицированных работников среднего и младшего звена — технологов и рабочих;

со времен плановой экономики сохранилась практически в неизменном виде жесткая структура государственных вузов и образовательных программ;

не завершено формирование системы независимой оценки качества образования на всех уровнях;

при формировании основных образовательных программ не в полной мере учитываются требования работодателей и государственных структур;

наблюдается недостаток стимулов к повышению качества образования.

Правительство РФ ставит перед образовательной системой России новые цели и задачи, которые должны обеспечить преемственность и развитие проведенных реформ. В частности поставлены следующие задачи [2]:

вывести российское образование на уровень мировых образовательных систем; увеличить число российских университетов, входящих в первую сотню мировых университетов согласно мировому рейтингу;

поднять на всех уровнях образования качество подготовки;

создать современную систему непрерывного образования, включающую дополнительное профессиональное образование, формы открытого образования и обеспечивающую каждому гражданину России условия получения профессионального образования желаемого уровня, повышения квалификации и переподготовки на протяжении всей жизни;

пересмотреть содержание и технологии реализации образовательных программ с учетом прогноза рынка труда, требований работодателей и обучающихся, а также ввести гибкие программы с разными сроками обучения, создать системы профессиональной оценки специалистов объединениями работодателей.

Приоритетом государственной программы «Развитие образования» является решение проблемы обеспечения рынка труда кадрами всех уровней профессиональной подготовки, чему должно способствовать внедрение образовательных программ, направленных на получение прикладных квалификаций, в том числе прикладного бакалавриата.

По мнению ряда исследователей, введение прикладного бакалавриата в вузах не только ликвидирует социальный разрыв между рабочими профессиями и повышенным социальным статусом, присущим выпускникам вузов, но и упростит процедуру продолжения подготовки на уровне реализуемого в настоящее время на основе ФГОС ВПО бакалавриата (далее этот уровень называется «академическим бакалавриатом»).

Эта задача требует отдельного внимания, поскольку уровень подготовки «прикладной бакалавриат» — новый и экспериментальный даже с учетом инновационности российского образования [14]. Со временем под него предполагается выделить в вузах до трети бюджетных мест.

Эксперимент по созданию прикладного бакалавриата проводится с 2009 года на базе 55

образовательных учреждений среднего и высшего профессионального образования. Программа прикладного бакалавриата должна обеспечивать как профессиональную практикоориентированную подготовку, характерную для образовательных программ среднего профессионального образования, так и профессиональную теоретическую подготовку, свойственную программам академического бакалавриата.

Выпускники, которые завершат освоение программы прикладного бакалавриата, разработанной по направлению подготовки бакалавриата ВПО, и успешно пройдут государственную (итоговую) аттестацию в образовательных учреждениях, будут иметь квалификацию «бакалавр» и получат документ государственного образца о высшем профессиональном образовании — диплом бакалавра.

Несмотря на то, что эксперимент по проверке эффективности прикладного бакалавриата еще не завершен, стратегия развития российского образования предусматривает его широкое внедрение уже в настоящее время. Предполагается, что к 2020 году бакалавриат должен стать общедоступным для выпускников средних школ и охватить до 80 % их числа.

В стратегии развития образования России ведущее значение отведено инновационным вузам страны, которые должны стать локомотивами развития образования. К таким вузам и относится Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), имеющий категорию национального исследовательского университета. Следовательно, инновационные задачи, поставленные программой «Развитие образования» на 2013–2020 годы, становятся приоритетными для нашего вуза.

В системе ведущих вузов России СПбГПУ занимает особое место. Само название «политехнический университет» характеризует межотраслевую направленность деятельности вуза в подготовке кадров высшей квалификации. Очевидно, что от СПбГПУ ждут новых прорывных образовательных технологий в области подготовки бакалавров и магистров технических направлений, нового педагогического опыта подготовки инженерных кадров, оформленного в виде соответствующих учебно-методических материалов, которые могли бы стать основой разработки государственных образовательных стандартов следующего поколения. Для решения подобных задач ведущим вузам страны Законом об образовании в России предоставлены исключительные права по развитию программ профессионального образования, в том числе право работать по самостоятельно устанавливаемым образовательным стандартам (СУОС).

СПбГПУ приступил к созданию СУОС в 2011 году в рамках реализации Программы развития национального исследовательского университета (НИУ) «Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисци-плинарные научные исследования и надотра-слевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики». По сути, эта работа является конкретизацией программы развития СПбГПУ как инновационного вуза на 2010–2019 годы (Электронный ресурс: http://www.spbstu.ru/). Среди задач этой программы следует выделить две: создание модели высшего политехнического образования и развитие политехнической школы высшего профессионального образования.

Впервые понятие «модель высшего политехнического образования» введено Инновационной программой развития СПбГПУ в 2007 году. В ней отмечается, что «... современная политехническая модель образовательного процесса — это схема матричного пересечения научно-образовательных школ и направлений подготовки. Активно действующие инженерные, физические, математические, экономические, социальные и экологические научные школы совместно обеспечивают подготовку выпускников» [6]. Представляется, что это наиболее методически развернутое определение модели высшего политехнического образования.

Первыми результатами комплексирования этого понятия являются СУОС, разработанные в СПбГПУ. Среди результатов:

издание ряда статей и научных монографий, посвященных разработке опережающих педагогических технологий СПбГПУ как национального исследовательского университета [11, 15 и др.];

разработка и утверждение на Ученом совете университета СУОС СПбГПУ по направлению подготовки бакалавров 150700 — «Машиностроение»;

издание научно-педагогической монографии, раскрывающей методологические основы создания СУОС СПбГПУ по направлению «Машиностроение» и основной образовательной программы (ООП) «Электрофизические и электрохимические технологии в машиностроении» [7];

разработка в 2012 году СУОС СПбГПУ еще по двум направлениям подготовки бакалавров и по двум направлениям подготовки магистров;

доклады по указанным материалам на научно-методических конференциях, в том числе и международных.

Результаты перечисленных направлений работы размещены на сайте Университета и переданы в Национальный фонд подготовки кадров для распространения педагогического опыта СПбГПУ.

Таким образом, можно заключить, что в СПбГПУ накоплен определенный, пусть пока недостаточно апробированный, опыт разработки СУОС. В настоящее время начинается внедрение разработанных СУОС для подготовки бакалавров и магистров.

При создании СУОС СПбГПУ коллективы разработчиков учитывали следующие системные принципы:

соответствие структуры СУОС СПбГПУ структуре ФГОС ВПО для обеспечения преемственности создаваемой системы подготовки и действующей учебно-нормативной документации в университете, а также для сохранения единого образовательного пространства России;

реализация в СУОС стратегических направлений развития образования России до 2020 года [2], которые на стадии начала процесса разработки СУОС СПбГПУ еще не были опубликованы, но уже широко обсуждались педагогической общественностью;

приведение в соответствие требованиям элементов ФГОС ВПО, о недостаточной проработке которых приводились сведения в научно-педагогической литературе [1, 13 и др.] (пример формулировки из ФГОС ВПО, которая нуждается в корректировке, приведен в [1]: «Требования к результатам освоения ООП в ФГОС ВПО сформулированы в форме перечня компетенций выпускников, который, как отмечают многие специалисты, слабо систематизирован и задан в довольно неудачном формате... Многочисленные (крупные) классы деления (десятки компетенций в каждой из групп — общекультурных и профессиональных компетенций), что не только затрудняет процесс управления ими, но и создает серьезные проблемы по диагностированию и оцениванию результатов освоения ООП»). Кроме того, методисты вузов отмечают сложности в реализации требования ФГОС ВПО по соответствию зачетных единиц академическим часам, указывают на отсутствие единого подхода к дифференциации видов деятельности выпускников различных уровней образования, и др.;

использование научно-педагогических рекомендаций по отбору содержания, форм и методов обучения студентов, разработанных в рамках Программы развития НИУ и опубликованных в работах [7, 15];

сохранение педагогических традиций подготовки специалистов в СПбГПУ, базу которых составили основы деятельности Политехнического института, заложенные его создателями.

Выделим положения, частично реализованные в СУОС СПбГПУ, выражающие инновационный аспект и способные сыграть роль методолого-педагогической основы модели высшего политехнического образования, отметив, что основное внимание в формулировке этих положений уделено принципам подготовки в СПбГПУ бакалавров. Это обусловлено следующим:

бакалавр является выпускником первого уровня ВПО, поэтому формировать методологию подготовки выпускников второго уровня ВПО — магистров — можно только после создания основ подготовки бакалавров;

в России проводится эксперимент по подготовке в вузах «прикладных бакалавров» наряду с традиционно выпускаемыми бакалаврами, которые названы ранее «академическими». Поэтому следует четко разграничить принципы подготовки академических бакалавров, которые должны применяться в СПбГПУ как национальном исследовательском университете, и основы подготовки прикладных бакалавров. Однако это не исключает возможности реализации подготовки прикладных бакалавров в Политехническом университете в рамках системы непрерывного профессионального образования, например на базе колледжа.

Инновационную основу разработанных СУОС подготовки бакалавров в университете составили следующие положения:

1. Разработка образовательного стандарта СПбГПУ и основной образовательной программы подготовки бакалавра любого направления осуществляется с целевой установкой на подготовку выпускника как специалиста широкой сферы деятельности (широкого профиля), способного на основе самостоятельной творческой деятельности после окончания университета осваивать новые области и виды профессиональной деятельности, не вошедшие в содержание его непосредственной подготовки в вузе. Выпускник, прошедший обучение в рамках определенного направления подготовки, должен быть способен самостоятельно освоить профессиональную деятельность по всем другим профилям подготовки бакалавров, вошедшим в примерную ООП ФГОС ВПО данного направления [11].

2. В общем перечне профессиональных компетенций бакалавра выделены две группы компетенций: профильные и творческие (см. рис.). Компетенции второй группы характерны именно для бакалавров широкого профиля. В связи с этим в СУОС СПбГПУ предложена и реализована новая система структуры профессиональных компетенций, в которых выделены общепрофессиональные, профильные профессиональные и системные профессиональные компетенции [7].

3. Образовательные стандарты СПбГПУ и ООП по профилю бакалавриата содержат компетенции, направленные на обеспечение подготовки креативного специалиста, перечисленные в работе [7]. К ним, в частности, отнесены такие умения выпускника:

самостоятельно определять ближнюю и дальнюю, внутрисистемную и межсистемную перспективы применения полученных знаний;

увидеть новую проблему в традиционной ситуации;

разработать структуру объекта деятельности;

находить новые функции объекта деятельности, отличающиеся от традиционных;

учитывать альтернативы при решении проблемы;

комбинировать и преобразовывать ранее известные способы деятельности при решении новой проблемы;

создавать принципиально новые подходы (способы, объяснения);

выполнять профессиональную деятельность на творческом уровне.

4. Бакалавриат в СУОС СПбГПУ рассматривается как этап системы непрерывного профессионального образования, включающей образовательные учреждения начального профессионального (НПО*), среднего профессионального (СПО), высшего профессионального образования (ВПО), послевузовского профессионального образования, аспирантуру, докторантуру и систему дополнительного профессионального образования. Эта система предусматривает подготовку на каждом уровне образования специалистов, полностью подготовленных к профессиональной деятельности, и предоставляет обучающимся возможность непрерывного, в течение всей сознательной жизни выбора образовательного маршрута в соответствии со своими желанием, стремлением, потребностями [5].

5. Цель образовательной системы России — подготовка для экономики страны профессиональных кадров, способных обеспечивать сопровождение продуктов деятельности соответствующей отрасли экономики на всех этапах их жизненного цикла, включая этапы исследования, проектирования, организации производства, изготовления, наладки, эксплуатации, ремонта, модернизации, утилизации. Отсюда возникает необходимость при разработке СУОС учитывать принцип дифференциации профессиональных и личностных качеств выпускников разных уровней образования по преимущественным трудовым функциям и видам деятельности, которые они должны уметь выполнять в рамках сопровождения типового продукта отрасли на всех этапах жизненного цикла.

В этом направлении реализовано распределение функций между выпускниками разных уровней образования, в совокупности обеспечивающее полное кадровое сопровождение типового продукта отрасли на его жизненном цикле. Это распределение предполагает следующее:

* В Законе «Об образовании в Российской Федерации» от 21 декабря 2012 года начальное профессиональное образование как уровень профессионального образования не установлен. Высшее профессиональное образование представлено уровнями бакалавриата, подготовки специалиста, магистратуры, подготовки научно-педагогических кадров, ординатуры.

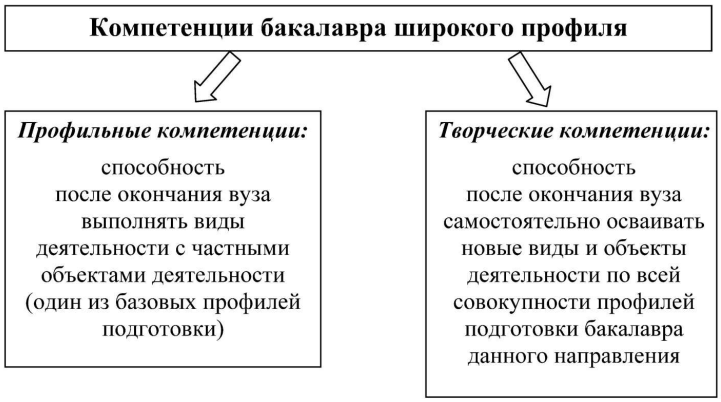


Рис. 1. Группы компетенций бакалавра широкого профиля

система НПО должна осуществлять подготовку выпускников для реализации преимущественно производственно-технологической функции;

система СПО должна быть ориентирована на подготовку выпускников для реализации организационно-производственной, ремонтно-технологической, производственно-эксплуатационной функций;

в системе ВПО следует разграничить компетенции бакалавров и магистров в части преимущественного выполнения ими функций обеспечения жизненного цикла типового продукта отрасли, а именно:

бакалаврам — проектно-конструкторская и проектно-технологическая функции, магистрам — научно-исследовательская функция, а также системные проектно-конструкторская и проектно-технологическая функции (этапы разработки технического задания, технического предложения, эскизного проектирования).

Дифференциация в выделении преимущественных функций выпускников не отрицает возможности освоения выпускником определенного уровня образования функций, преимущественно относящихся к другому уровню профессионального образования. Поэтому в СУОС СПбГПУ в характеристике выпускника конкретного направления подготовки определяется несколько видов деятельности, располагаемых в последовательности их значимости.

6. Научно-методологической основой разработки технологии подготовки креативного бакалавра широкой сферы деятельности принят системно-деятельностный подход [3], из которого следует, что ведущим и организующим фактором в обучении служит деятельность обучающегося. Деятельностный подход в обучении характеризуется тем, что определяющая деятельность обучающегося — поисковая. Эта деятельность должна быть сознательной, активной и адекватной системе усваиваемого материала и уровня профессиональной деятельности.

7. Методическими основами определения содержания подготовки бакалавра широкого профиля, который в соответствии с ФГОС ВПО должен быть «готов к жизни и профессиональной деятельности», приняты:

недопущение ориентации содержания обучения студента на последующее «доучивание» в магистратуре;

системная фундаментализация обучения. Фундаментализация подразумевает направление совершенствования подготовки бакалавров (специалистов, магистров) путем развития целостной педагогической системы и каждого из ее элементов (не только содержания обучения) на основе фундаментальных положений современного научного знания [13];

усиление роли общепрофессиональной подготовки в общей структуре содержания обучения за счет увеличения трудоемкости изучения общепрофессиональных дисциплин [11];

единый для всех технических направлений подготовки и специальностей развитый базис общепрофессиональной подготовки, сформированный на основе профессиональноориентированных мультидисциплинарных политехни-

ческих знаний и умений. Политехническое образование в этом случае выступает как составная часть образования, связанная с усвоением обучающимся общенаучных принципов современного производства и овладением практическими навыками обращения с орудиями труда, машинами и механизмами, а также как условие формирования способности ориентироваться в современной технике и технологии [10];

осуществление перестройки содержания и методики преподавания специальных дисциплин, которые в своем содержании получают методологическую направленность. Суть этой направленности состоит в том, что содержание специальных дисциплин бакалавров широкого профиля ориентировано на мировоззренческие, методологические, методические и социальные проблемы соответствующих наук. Изучение частных научных фактов, конкретных закономерностей, явлений, практических приложений отраслевого, прикладного характера осуществляется на базе обобщенных (фундаментальных) идей и принципов, характерных для данной науки. Специальные дисциплины профильной направленности выступают в качестве примеров реализации основных функций и видов деятельности выпускника направления. Это является залогом формирования у студента творческих компетенций второй группы (см. рис.) ибо предполагает:

обучение студентов с использованием исследовательских методов и средств обучения. Учебный процесс при этом выступает как метод научного познания объективной реальности, исследуемой в базовой для учебной дисциплины науке, а также в иных областях научных знаний [8];

расширение объемов самостоятельной работы студентов и усиление контроля за ее выполнением;

системную информатизацию обучения;

реализацию индивидуализированных технологий обучения на основе личностно-ориентированных методов, технологий непрерывного профессионального образования;

формирование у выпускника как специалиста определенной сферы деятельности системного мышления и других профессионально значимых качеств личности и соответствующих социальных компетенций.

8. Важнейшим фактором подготовки в СПбГПУ бакалавров широкого профиля, магистров и специалистов, обладающих общепрофессиональными, профильными профессиональными и системными компетенциями, признана интеграция научно-исследовательской и учебной деятельности педагогического коллектива. Фундаментальной научной основой политехнического подхода в образовании становятся мультидисциплинарные научные исследования, выполняемые на базе передовых межотраслевых и надотраслевых технологий, направленные на решение крупномасштабных научно-технических проблем. Процесс исследования и его результаты выступают при этом как элементы учебного процесса. С этой целью в СПбГПУ уже созданы и развиваются уникальные для российского образования структуры (Объединенный научно-технологический институт).

9. Системной основой технологии обучения бакалавров в СУОС принят интегративный подход, базой которого являются междисциплинарные связи [12]. Процесс интегративного взаимодействия дисциплин и дидактических компонентов междисциплинарного синтеза становится для обучающихся предметом интериоризации, т. е. личностного усвоения знаний с возможностью дальнейшего переноса на другие аспекты профессиональной деятельности. Дидактическая интеграция в образовании — это не просто объединение содержательных компонентов изучаемых дисциплин, но процесс их взаимодействия, взаимопроникновения и дополнения. Представляя собой один из уровней интеграции, междисциплинарные связи реализуются за счет интеграции дисциплин. Обучение с использованием междисциплинарных связей предъявляет особые требования к методам преподавания интегрируемых дисциплин.

Сформулированные в статье и реализованные в разработанных СУОС СПбГПУ инновационные положения требуют методической детализации. Планируется их оформление в виде Положения о самостоятельно разрабатываемых образовательных стандартах СПбГПУ с целью обсуждения педагогической общественностью, дополнения и развития. Следующий шаг — доработка Положения применительно к подготов-

ке магистров в русле стратегии модернизации образования Российской Федерации до 2020 года и направлений развития СПбГПУ. Главная задача на ближайшую перспективу — обеспечить, чтобы подготовка по новым самостоятельно устанавливаемым образовательным стандартам (СУОС) началась в СПбГПУ уже в 2013 году, а сами стандарты отвечали требованиям, которые поставило перед ведущими вузами страны Правительство РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка проекта методических рекомендаций по формированию требований к результатам освоения основных образовательных программ, реализуемых на основе самостоятельно устанавливаемых университетами образовательных стандартов и требований. Создание методологических подходов для оценивания компетенций выпускников [Текст] / Аналитическая записка Рабочей группы Межвузовского центра «Инновационное образование» и Национального фонда подготовки кадров: [Электронный ресурс].— Режим доступа: http://fgosvpo.ru/

2. Государственная программа Российской Федерации «Развитие образования» на 2013–2020 годы [Текст] / Распоряжение Правительства РФ от 22 ноября 2012 г. № 2148-р. [Электронный ресурс].— Режим доступа: http://fgosvpo.ru/uploadfiles/npo/20121203174606.pdf

3. Деятельностный подход к построению учебно-методических материалов [Текст]: Методический материал // Новые технологии обучения в высшем образовании.— Москва—Уфа, 1988.— 37 с.

4. Закон об образовании в Российской Федерации. ФГОС ВПО [Текст] / Принят Государственной думой 21 декабря 2012 года.— [Электронный ресурс].

5. **Зильберман, С.М.** Непрерывное профессиональное образование, широкопрофильность, фундаментальность и междисциплинарность— основа модернизации системы отечественного образования [Текст] / С.М. Зильберман, В.И. Никифоров, Ю.С. Перфильев, В.А. Шершнева / Под общей ред. Ю.С. Перфильева.— Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010.— 395 с.

6. Инновационная образовательная программа СПбГПУ. Итоги 2007 года [Текст] / СПбГПУ.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.— 78 с.

7. Концепция, методика проектирования и проекты образовательного стандарта и основной образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 150700— «Машиностроение». Профиль: «Электрофизические и электрохимические технологии в машиностроении» [Текст] / В.И. Никифоров [и др.]; под ред. В.И. Никифорова, М.М. Радкевича.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— 357 с.

8. **Никифоров, В.И.** Учебный процесс как метод научного познания // Вестник высшей школы. Alma Mater.— 2010. № 3.— С. 39–44.

9. **Никифоров, В.И.** Педагогические уроки истории Политехнического института (университета) [Текст] / В.И. Никифоров, А.В. Речинский.— Интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах. Том 1.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.

10. **Никифоров, В.И.** Политехническое образование в содержании подготовки студентов технических вузов [Текст] / В.И. Никифоров, А.В. Речинский // Вестник высшей школы. Alma Mater.— 2011. № 7.— С. 41–45.

11. **Никифоров, В.И.** Перечни направлений и профили подготовки. Педагогические основы и методика проектирования [Текст] / В.И. Никифоров, А.В. Речинский.— Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011.— 148 с.

12. **Попова, Н.В.** Междисциплинарная парадигма как основа формирования интегративных компетенций студентов многопрофильного вуза (на примере дисциплины «Иностранный язык») [Текст]: Дисс. ... докт. пед. наук / Н.В. Попова.— СПб., 2011.— 585 с.

13. Проектирование основных образовательных программ, реализующих федеральные государственные образовательные стандарты высшего профессионального образования [Текст]: Методические рекомендации для руководителей и актива учебно-методических объединений вузов / Под науч. ред. д-ра техн. наук профессора Н. А. Селезневой. Изд. 2-е, перераб. и дополн. / Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. Координационный совет учебно-методических объединений и научно-методических советов высшей школы.— М., 2010.— 92 с.

14. Разработка и апробация комплекса мероприятий по интеграции государственной и корпоративной сетей подготовки рабочих кадров и специалистов СПО, обеспечивающих кадровые потребности развития приоритетных отраслей экономики (Прикладной бакалавриат, реализация проекта в 2011–2013 гг.). [Электронный ресурс].— Портал Национального фонда подготовки кадров (НФПК).— Режим доступа: http://bakalavr.ntf.ru/p60aa1.html

15. **Речинский, А.В.** Проектирование и реализация образовательных стандартов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета [Текст] / А.В. Речинский, В.И. Никифоров, Л.В. Черненькая // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки.— СПб.: Изд-во СПбГПУ.— 2012. № 1 (143).— С. 65–72.

РЕЧИНСКИЙ Александр Витальевич — *кандидат технических наук, заведующий кафедрой компьютерных интеллектуальных технологий института информационных технологий и управления, проректор по учебной работе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812)-294-45-64
alexander.rechinsky@spbstu.ru

НИКИФОРОВ Валерий Иванович — *кандидат технических наук, профессор кафедры технологий конструкционных материалов и материаловедения института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 534-75-18;
valerii.nikiforov@gmail.com

ЧЕРНЕНЬКАЯ Людмила Васильевна — *доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления института информационных технологий и управления, директор департамента менеджмента качества Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-76-40;
ludmila@qmd.spbstu.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 372.881.111.1

М.А. Акопова, Н.В. Попова

ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ СОДЕРЖАНИЯ ОБУЧЕНИЯ ИНОСТРАННЫМ ЯЗЫКАМ В СОВРЕМЕННОМ ВУЗЕ (ПРОЕКТ IELTS)

M.A. Akopova, N.V. Popova

INNOVATIONAL ASPECTS OF FOREIGN LANGUAGE TEACHING CONTENT IN MODERN UNIVERSITY (PROJECT IELTS)

Рассматривается важная роль института прикладной лингвистики (ИПЛ) СПбГПУ в изменении и углублении содержания обучения иностранному языку на современном этапе. Анализируются возможности подготовки к международному экзамену IELTS в бакалавриате. Предлагается увеличить общее количество часов иностранного языка и распределить их по трем дисциплинам, реализуемым за счет федерального, вузовского и факультативного компонентов учебного плана.

ИНОСТРАННЫЙ ЯЗЫК. БАКАЛАВРИАТ. ПРИКЛАДНАЯ ЛИНГВИСТИКА. МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭКЗАМЕН IELTS. ПРОГРАММА. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ.

Important role of the Institute of Applied Linguistics (IAL) formed in St.Petersburg State Polytechnical University (SPSPU) in changing and deepening the contents of modern foreign language teaching is considered. Possibilities of bachelor training for international IELTS examination are analyzed. The foreign language workload is proposed to be increased and distributed in three disciplines realized as Federal, institutional and elective curriculum components.

FOREIGN LANGUAGE. BACHELOR CURRICULUM. APPLIED LINGUISTICS. INTERNATIONAL EXAMINATION IELTS. SYLLABUS. DISCIPLINE VOLUME DISTRIBUTION.

Содержание обучения — это одна из важнейших категорий теории обучения иностранному языку (ИЯ), отражающая предметный и процессуальный аспекты. Если первый аспект соотносится с разнообразными знаниями обучающихся об окружающем мире или о своей профессии, то второй, процессуальный аспект включает умения и навыки использования приобретаемых знаний с целью осуществления устной и/или письменной коммуникации [3]. Являясь динамической, а не статичной категорией, содержание обучения может варьироваться в зависимости от стоящих перед обществом задач, определяемых концепциями развития образования, федеральными и самостоятельными стандартами университетов. В связи с повсеместным введением бакалавриата и магистратуры необходимо рассмотреть содержание обучения иностранному языку на первой, наиболее массовой, ступени высшего образования в контексте существующих возможностей развития академической и профессиональной мобильности.

Подготовка бакалавров на современном этапе развития науки и высшей школы — это чрезвычайно сложный процесс, требующий пристального внимания организаторов образования. Обучение в бакалавриате должно фактически обеспечить широкую базу для будущей специализации в магистратуре и перехода к профессиональной деятельности. Поскольку в настоящее время наблюдается усиление международных контактов во всех сферах жизни, то специалисты с высоким уровнем иноязычной коммуникативной компетенции становятся все более востребованными. Рассматривая важность владения иностранным языком, мы прежде всего имеем в виду английский, который, как язык высокой плотности, уже превратился в глобальный язык межнационального общения [6]. На нем выходит более 90 % всех научных публикаций, на нем

представлено максимальное количество электронных ресурсов интернета.

Являясь национальным исследовательским университетом, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ) имеет возможность разрабатывать самостоятельные образовательные стандарты. Разработаны принципы проектирования педагогической концепции, закладываемой в их основу, методики формирования учебно-программной документации при работе по образовательным стандартам, которые самостоятельно разрабатываются вузом в условиях функционирования двухуровневой системы высшего профессионального образования. Переход на работу по образовательным стандартам вуза (ОСВ) создает дополнительные возможности для всего педагогического коллектива Политехнического университета по внедрению инновационных педагогических технологий, а соответственно, появляются предпосылки к достижению нового уровня качества подготовки выпускника. Не противореча ФГОС, ОСВ позволяют обосновать инновационные аспекты содержания обучения различным дисциплинам, в частности ИЯ, на современном этапе.

Образованный в СПбГПУ институт прикладной лингвистики (ИПЛ) имеет все необходимые ресурсы и средства реализовать намеченные изменения и углубить содержание обучения ИЯ. Роль прикладной лингвистики [1] поистине огромна и заключается в том, чтобы обеспечить решение многообразных специфических проблем, требующих использования языка. Цель прикладной лингвистики — применение результатов научных исследований и открытий лингвистики и смежных наук для решения практических вопросов, связанных с использованием языка, и это подчеркивает междисциплинарную сущность прикладной лингвистики. Область исследования прикладной лингвистики охватывает язык для специальных целей, например язык и проблемы коммуникации в научно-технической сфере, общенаучный язык, языковую политику и языковое планирование и многие другие.

Иначе говоря, исследовательское пространство, покрываемое понятием «прикладная лингвистика», чрезвычайно широко. Оно включает в себя любые практические задачи, требующие лингвистических знаний, начиная с обучения родному и иностранному языку и кончая автоматизированной обработкой данных. К числу наиболее интенсивно развивающихся областей прикладной лингвистики относятся: методика преподавания родного и иностранного языков, а также преподавание иностранного языка для специальных целей (бизнес-язык, язык для научных целей, язык для сдачи международного экзамена при необходимости учебы или работы за рубежом и т. д.); межкультурная коммуникация; лингводидактика; теория перевода; терминоведение; стилистика; психолингвистика; лексикография; теория искусственных языков; прикладная риторика; теория массовой коммуникации; текстология, нормирование языка и языковое планирование; корпусная лингвистика; автоматическая обработка речевой информации в письменной или устной форме; вопросы тестирования; билингвизм; анализ дискурса; вопросы языковой политики и планирования; автоматическая обработка речевой информации и т. д.

Таким образом, прикладная лингвистика — это область знаний, требующая использования языка как основного инструмента деятельности для решения разнообразных задач прикладного характера, в том числе и в технических областях. Это также проблемы, связанные с исследованием роли родного языка и культуры в обучении иностранных студентов, относящихся к различным культурным традициям. Сегодня существует весьма разветвленная сеть ассоциаций специалистов по прикладной лингвистике, которые ставят своей задачей популяризацию идеи о необходимости изучения иностранных языков и культур, а также оказание помощи людям в достижении ими образовательных, социальных и карьерных целей за счет умения эффективно общаться. Эта задача требует проведения исследований, разработки практических материалов для подготовки специалистов, способных помочь людям в решении вышеперечисленных проблем.

Исходя из новой концепции иноязычного образования, отвечающей вызовам нашего времени, в программу по ИЯ, помимо общего и профессиональноориентированного аспектов, решено включить изучение форматов международных экзаменов, которые обеспечивают объ-

ективную оценку владения иностранным языком студентами. Положительные результаты международных экзаменов востребованы при трудоустройстве выпускников, а также способствуют повышению академической мобильности обучающихся. Считаем, что высокие баллы по международным экзаменам, в которых тестируются все виды речевой деятельности (чтение, аудирование, говорение и письмо), — более показательные критерии знания иностранного языка, чем, например, защиты бакалаврских квалификационных работ на иностранном языке.

В связи с достаточно большим количеством международных экзаменов необходимо обосновать выбор формата тестирования по английскому языку. Представляется, что формат IELTS (International English Language Testing System) наиболее оптимален по следующим причинам:

IELTS — международная система тестирования по британскому варианту английского языка для определения навыков владения теми, кто собирается обучаться или проходить практику в англоязычной среде; она позволяет определить уровень владения английским языком у людей, для которых английский не является родным. IELTS принимается в более чем 120 странах мира и на сегодня является одним из самых распространенных и востребованных экзаменов по английскому языку;

IELTS — диагностический экзамен. Это значит, что его нельзя «завалить» и оценку 0 можно получить только в случае отсутствия на экзамене. В любом другом случае студент получает сертификат с баллами от 1 до 9 . Как правило, для учебы в вузах требуется получить 7–7,5 баллов. Получение студентами 4 баллов и выше будет соответствовать оценке 5;

с учетом перспективы обучения на иностранном языке студентов неязыковых направлений целесообразно выбирать академический, а не общий вариант экзамена IELTS. Текстовые материалы для экзамена насыщены общетехнической и общенаучной лексикой, тестовые задания содержат графики, схемы, таблицы, что нам представляется весьма релевантным для указанного контингента обучающихся.

Поскольку результат теста действителен в течение двух лет с момента получения, целесообразно проводить его в конце четвертого года обучения в вузе. При условии создания студенческих групп численностью не более 15 человек и соблюдения указанной нормы часов на выполнение экзамена IELTS должна быть успешной. Литература по подготовке программы обучения для академического варианта международного экзамена IELTS общедоступна для трех уровней обучения ИЯ [9–11 и др.].

Дополнительным залогом успешности данного направления языковой подготовки является высокая квалификация преподавательского состава ИПЛ, который уже насчитывает 15 экспертов по международным экзаменам, в частности по IELTS. Право проведения преподавателями экспертизы результатов IELTS подтверждается соответствующими сертификатами. Количество преподавателей-экспертов будет непрерывно расти, поскольку у института прикладной лингвистики налажены связи с городским центром международного тестирования.

Сдача международного экзамена IELTS может быть организована в СПбГПУ при бесплатном диагностическом тестировании на первом курсе. Предъявление результатов экзамена IELTS будет обязательным только для студентов, желающих получить оценку «5» по английскому языку, в то время как для всех остальных студентов сдача экзамена IELTS будет добровольной. Однако в связи с популярностью данного экзамена в студенческой среде у нас есть все основания предположить, что его будут сдавать и слабые, но очень мотивированные студенты. Для повышения своего уровня знаний эти студенты смогут пройти дополнительный курс подготовки в лингвистическом центре СПбГПУ.

Международный экзамен IELTS четко коррелирует со шкалой Совета Европы по иностранному языку, что показано в табл. 1.

Как видно из этой таблицы, итоговые оценки по английскому языку могут выставляться исходя из результатов сданного международного экзамена. Нужно отметить, что существуют также таблицы перевода результатов IELTS в экзаменационные баллы международных экзаменов TOEFL, FCE, CAE, что весьма удобно при изменении жизненных планов обучающихся.

С учетом существующих учебных планов по ФГОС неязыковых направлений подготовки бакалавров нужно иметь в виду, что необходимая

Таблица 1

Корреляция баллов, выставляемых в системе международного тестирования IELTS, и уровней Совета Европы

Шкала уровней владения ИЯ, принятая Советом Европы	Баллы IELTS	Оценки экзамена по английскому языку в СПбГПУ
A1	1,5–3,0	3
A2	3,5–4,0	4
B1	4,5–5,0	4
B2	5,5–6,0	5
C1	6,5–7,0	5
C2	7,5–9,0	5

для подготовки к международному экзамену повышенная норма часов на аудиторную и самостоятельную работу по иностранному языку как единой дисциплине для многих институтов может оказаться неосуществимой. В связи с этим нужно тщательно продумать возможности распределения языковой нагрузки исходя из параметров учебных программ и усредненного ФГОС по техническому направлению подготовки [4, 7, 8].

Для того чтобы неязыковые направления подготовки бакалавров имели больше возможностей размещения в своих рабочих учебных планах повышенной нормы часов по иностранному языку, рекомендуется разделить весь курс ИЯ на три части, которые станут отдельными дисциплинами и могут иметь следующие названия:

1. Базовый курс ИЯ.
2. Профессиональноориентированный ИЯ.
3. Подготовка к международному экзамену по ИЯ.

Если «Базовый курс иностранного языка» может реализовываться как дисциплина федерального компонента за счет базовой части Б.1 ФГОС, то остальные две дисциплины могут быть включены в учебный план неязыкового направления как дисциплины регионального (вузовского) компонента по выбору студентов или как факультатив. Нам представляется, что предлагаемое нами деление дисциплины «Иностранный язык» на три части, реализуемые за счет разных составляющих учебного плана направления вузовской подготовки, позволит кафедрам творчески подходить к организации обучения бакалавров иностранному языку. Ниже приводятся табл. 2–4, в которых показано примерное распределение учебной нагрузки по трем дисциплинам иностранного языка в бакалавриате.

Оценивая полученные нами результаты распределения объема трех учебных дисциплин на базе английского языка в учебных планах неязыковых направлений подготовки, мы считаем возможным осуществить проект IELTS при реализации обучения за счет учебных часов федерального, вузовского и факультативного компонентов. Задания в формате международного экзамена будут при этом дополнять базовый и профессиональноориентированный курсы ИЯ и превалировать в факультативной дисциплине. Гибкий подход выпускающих кафедр к данному вопросу позволит нам объединить усилия для подготовки бакалавров, готовых к дальнейшему обучению на английском языке и работе в международных проектах.

Расширение и углубление программы обучения ИЯ за счет введения в нее инновационного содержания, отвечающего духу времени, позволит преподавателям ИЯ внести определенную лепту в создаваемую педагогическую концепцию деятельности Политехнического университета. Усиление гуманитарной составляющей в содержании обучения студентов-политехников [2] будет отражено в инновационной учебно-программной документации, которую еще предстоит создать. Именно гуманитарная составляющая вузовского образования может способствовать переходу нашего вуза на инновационные технологии педагогической деятельности, которые, к сожалению, не получили освещения в Программе развития ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на 2010–2019 годы.

Таблица 2

Распределение объема учебной дисциплины «Базовый курс иностранного языка» по видам учебных занятий и формы контроля для очной формы обучения

Виды учебной работы	Трудоемкость по семестрам и выдам учебной работы						Итого, а. ч.
	1 семестр		2 семестр		3 семестр		
	а. ч./нед	а. ч./сем	а. ч./нед	а. ч./сем	а. ч./нед	а. ч./сем	
Практические занятия:	2	36	2	36	6	108	180
в том числе аудиторные занятия в интерактивной форме	–	18	–	18	–	54	90
Самостоятельная работа:	–	18	–	18	–	54	90
в том числе творческая проблемноориентированная самостоятельная работа	–	10	–	10	–	30	50
Зачеты	+		+		+		
Общая трудоемкость освоения дисциплины:							
в академических часах (а. ч.)							270
в зачетных единицах:							7,5

а. ч. — академический час

Таблица 3

Распределение объема учебной дисциплины «Профессионально-ориентированный ИЯ» по видам учебных занятий и формы контроля для очной формы обучения

Виды учебной работы	Трудоемкость по семестрам				Итого, а. ч.
	4 семестр		5 семестр		
	а. ч./нед	а. ч./сем	а. ч./нед	а. ч./сем	
Практические занятия, семинары:	6	108	6	108	216
в том числе аудиторные занятия в интерактивной форме	–	54	–	54	108
Самостоятельная работа:	–	54	–	54	108
в том числе творческая проблемноориентированная самостоятельная работа	–	20	–	20	40
Экзамены (подготовка во время сессии, сдача)	–	–	–	36	36
Общая трудоемкость освоения дисциплины:					
в академических часах					360
в зачетных единицах					10

Таблица 4

Распределение объема учебной дисциплины «Подготовка к международному экзамену по ИЯ» по видам учебных занятий и формы контроля для очной формы обучения

Виды учебной работы	Трудоемкость по семестрам						Итого а. ч.
	6 семестр		7 семестр		8 семестр		
	а. ч./нед	а. ч./сем	а. ч./нед	а. ч./сем	а. ч./нед	а. ч./сем	
Практические занятия:	6	108	4	72	4	72	252
в том числе аудиторные занятия в интерактивной форме	–	54	–	36	–	36	126
Самостоятельная работа:	–	54	–	36	–	36	126
в том числе творческая проблемноориентированная самостоятельная работа	–	30	–	20	–	20	70
Экзамены (подготовка во время сессии, сдача)	–	–	–	–	–	36	36
Общая трудоемкость освоения дисциплины:							
в академических часах							414
в зачетных единицах							11,5

Таблица 5

Сводные данные по распределению объема трех учебных дисциплин на базе иностранного языка по видам учебных занятий и формы контроля для очной формы обучения

Виды занятий и формы контроля	Объем по семестрам							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Практические занятия, час.	36	36	108	108	108	108	72	72
Самостоятельная работа (СР), час.	18	18	54	54	54	54	36	36
Рефераты, шт.	–	–	–	–	–	–	–	1
Контрольные работы, шт.	1	1	2	2	2	2	2	2
Зачеты, шт.	1	1	1	1	–	1	1	-
Экзамены, шт.	–	–	–	–	1	–	–	1
Общая трудоемкость дисциплины составляет 1044 часа (29 зачетных единиц)								

Программа развития СПбГПУ [5] могла бы только выиграть, если бы в ней получило отражение предлагаемое нами инновационное содержание по дисциплине гуманитарного цикла «Иностранный язык». Нас, гуманитариев, не может не удивлять, что, несмотря на указанную в этой программе необходимость применения и распространения глобально значимых мультидисциплинарных политехнических знаний, подготовки научно-технических кадров нового

поколения, которые должны обладать компетенциями мирового уровня и быть готовыми обеспечить конкурентоспособность отечественных научных организаций и промышленных предприятий, составители программы даже не упоминают о важнейшем значении иностранного языка для осуществления поставленных целей.

Очевидно, что обозначенные в программе приоритетные направления развития СПбГПУ не могут стать значимыми на фоне мирового развития науки без стабильной и тщательно продуманной языковой поддержки наших студентов на всех уровнях обучения в университете. Хотя предлагаемый нами путь к получению международного сертификата по IELTS достаточно долог и труден, именно этот сертификат будет свидетельствовать, что наши выпускники обладают компетенциями мирового уровня. Приобретенная ими высокоразвитая иноязычная коммуникативная компетенция сделает их по-настоящему конкурентоспособными на рынке труда, а наш вуз, таким образом, станет еще выше котироваться среди наиболее престижных университетов мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акопова, М.А.** Прикладная лингвистика: проблемы и перспективы (XIV международный съезд по прикладной лингвистике) [Текст] / М.А. Акопова // Вопросы методики преподавания в вузе. Вып. 8.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005.— С. 3–8.

2. **Акопова, М.А.** Гуманитарная составляющая образовательной среды в техническом вузе [Текст]: Монография / М.А. Акопова, Н.И. Алмазова, Л.Г. Жук, Т.В. Савушкина.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.— 138 с.

3. **Гальскова, Н.Д.** Теория обучения иностранным языкам : лингводидактика и методика [Текст]: учеб. пособие / Н.Д. Гальскова, Н.И. Гез.— 3-е изд., стер.— М. : Academia, 2006.— 334 с.

4. «Иностранный язык» для неязыковых вузов и факультетов. Примерная программа. М., 2009. 24 с. [Электрон. ресурс] // www.tstu. ru/education/oop/doc/ppd_01.doc.— Дата обращения 01.03.2012.

5. **Программа развития** государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на 2010–2019 годы [Электрон. ресурс] // http://www.spbstu.ru/science/scientific_directions/. Дата обращения: 01.03.2013. 17 с.

6. **Сальникова, М.В.** Глобализация, развитие ИКТ и профессиональная подготовка переводчиков [Текст] / М.В. Сальникова // Сб.: Информационно-коммуникационные технологии в лингвистике, лингводидактике и межкультурной коммуникации.— Вып. 5 / М-во образования и науки РФ [и др.]; под ред. А.Л. Назаренко.— М.: Центр дистанц. образования: Фак. иностр. яз. и регионоведения МГУ им. М.В.Ломоносова, 2012.— С. 59–67.

7. **УМК дисциплины** «Иностранный язык (английский)» для технических факультетов [Текст] / Под ред. доц. Т.Н. Крепкой, ст. преп. Т.Н. Ивановой.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— 560 с.

8. **Федеральный государственный образовательный стандарт** высшего профессионального образования по направлению подготовки 270800 — Строительство (квалификация (степень) «Бакалавр»).— [Электрон. ресурс] // http://uap.spbstu.ru/images/stories/uap_deptedu/54.pdf. Дата обращения: 01.03.2013.

9. **Haines, S.** IELTS Masterclass [Текст] / S. Haines, P. May.— Oxford University Press, 2010.— 194 с.

10. **Jakerman, V.** New insights into IELTS [Текст] / V. Jakerman, C. MacDowell.— Cambridge university press, 2009.— 192 p.

11. Terry, M. IELTS- Practice Tests— Plus 2 [Текст] / M. Terry, J. Wilson.— Graficas Estella, 2006.— 208 p.

АКОПОВА Мария Алексеевна — *доктор педагогических наук, профессор, директор института прикладной лингвистики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 297-03-18
lingua@mail.spbstu.ru

ПОПОВА Нина Васильевна — *доктор педагогических наук, доцент кафедры лингвистики и межкультурной коммуникации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 297-97-84
ninavaspo@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 378.1

В.Н. Боронин, А.И. Кириллов,
Н.В. Коровкин, С.З. Сапожников

СОДЕРЖАНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ИНСТИТУТЕ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ СПБГПУ

V.N. Boronin, A.I. Kirillov,
N.V. Korovkin, S.Z. Sapozhnikov

THE CONTENT OF THE FUNDAMENTAL ENGINEERING EDUCATION AT THE INSTITUTE OF ENERGY AND TRANSPORT SYSTEMS SPbSPU

В статье рассмотрена особая роль и специфика образования на кафедрах теоретических основ электротехники и теоретических основ теплотехники института энергетики и транспортных систем СПбГПУ. Отмечается необходимость сохранения глубокого физико-математического фундамента в процессе подготовки инженеров и научных кадров.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ДИСЦИПЛИНА.

The article considers the special role and specificity of education in the departments of Theory of Electrical Engineering and Institute of Theoretical Foundations of Thermal Energy and transport systems STU. Notes the need to preserve the deep physical and mathematical foundations in the training of engineers and scientists.

THEORY OF ELECTRICAL ENGINEERING. THE THEORETICAL BASIS OF HEAT ENGINEERING. BASIC ENGINEERING DISCIPLINE.

Развитие России как научно-технической державы возможно только на основе использования достижений науки, опережающей развитие ключевых направлений нового технологического уклада, дальнейшей интеллектуализации производства, перехода к непрерывному инновационному процессу, сокращению до минимума фазы внедрения и освоения новой техники. Только при этих условиях страна сможет занять в ближайшее десятилетие достойное место среди развитых стран.

Успешное решение этих задач будет определяться развитием фундаментальной науки и подготовкой востребованных инженерных и научных кадров. Таким образом, резко возрастает роль и ответственность ученого и инженера за социальные последствия своей деятельности.

В структуре института энергетики и транспортных систем выделены общеинженерные кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) и «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ), на которые возложена фундаментальная подготовка бакалавров, специалистов и магистров соответствующих направлений. На этих кафедрах студенты должны научиться языку будущих профилей подготовки, специальностей и программ, а шире — воспринять научное и инженерное мировоззрение своей профессии. Особая роль и специфика образования на кафедрах ТОЭ и ТОТ составляет предмет дальнейшего обсуждения.

Одна из важнейших отраслей науки и техники, где должно происходить проектирование и производство высокотехнологичных изделий, — это электротехника. Нет такой области техники, где в том или ином виде не использовались бы электрические и магнитные явления. Все открытия и исследования электромагнитных явлений неизменно связаны с практическими приложениями, что в свою очередь обогатило электротехнику, способствовало решению актуальных задач электроэнергетики, электромеханики, электроники и других направлений.

Важное место в системе подготовки инженерных и научных кадров для нужд электротехники, электромеханики, электроэнергетики, а также для современных электронных, информационных технологий занимает фундаментальная инженерная дисциплина «**Теоретические основы электротехники**» (ТОЭ). Отметим, что формирование учебного процесса по ТОЭ и его связь с научными изысканиями в Политехническом институте (СПбГПУ) осуществлялись на базе органичного сочетания естественнонаучных знаний и практики, технических и гуманитарных дисциплин.

Фундаментальное физико-математическое образование, лежащее в основе дисциплины ТОЭ, в значительной степени стало возможным благодаря открытию к началу XX века важнейших физических явлений и законов, а также достижениям математической науки. Фундаментальные открытия в области электричества и магнетизма стали предпосылками для важных научных обобщений. Развитие физических представлений о строении материи и элементарных частиц объяснило существование материи в виде электромагнитного поля.

Д.К. Максвелл, обобщив результаты экспериментальных исследований Ш. Кулона, А. Ампера, законов и идей М. Фарадея и Э.Х. Ленца, сформулировал на их основе систему уравнений электромагнитного поля, описывающую его поведение. Система уравнений Максвелла стала математической моделью электромагнитного поля для самого общего случая. Приспособление этой модели к свойствам исследуемого устройства и стало одной из основных задач теоретической электротехники при создании общих методов разработки конкретных математических моделей, т. е. математического описания электромагнитных процессов в техническом устройстве.

Становление дисциплины ТОЭ в Политехническом институте можно отнести к 1904 году, когда профессор В.Ф. Миткевич впервые начал читать лекции на электромеханическом отделении по курсу «Теория электрических и магнитных явлений». На основе идей М. Фарадея и Д. Максвелла и с использованием математических методов В.Ф. Миткевич излагал фундаментальные физические явления в различных электротехнических устройствах. Этот курс в 1910 году был издан под названием «Теория явлений электрических и магнитных» и неоднократно переиздавался под названием «Физические основы электротехники».

Наряду с изучением физических представлений об электрических и магнитных явлениях в курсе ТОЭ сформировался раздел, посвященный изучению электрических цепей. Выявленные особенности процессов в электрических цепях и их математические модели позволили создать специфические методы расчета и сохранить теорию электрических цепей в качестве самостоятельного раздела. Лекции по второму основному курсу — «Теория переменных токов» — В.Ф. Миткевич начал читать вслед за курсом «Теория электрических и магнитных явлений». Этими двумя курсами и была, по существу, создана дисциплина ТОЭ, которая и по сей день является важнейшим звеном высшего электротехнического образования.

Академик В.Ф. Миткевич (1872–1951), основатель школы теоретиков-электротехников, заведовал кафедрой ТОЭ до 1931 года. С 1931 по 1951 год кафедру возглавлял профессор П.Л. Калантаров (1892–1951), внесший большой вклад в развитие лабораторной базы кафедры.

Академик АН СССР Л.Р. Нейман (1902–1975) заведовал кафедрой с 1952-го по 1975 год. Он продолжил развитие школы, заложенной В.Ф. Миткевичем, обращая особое внимание на практическое решение актуальных задач в области электротехники и электроэнергетики.

Академик РАН К.С. Демирчян работал на кафедре с 1953 по 1978 год, заведовал кафедрой с 1975-го по 1978-й и в настоящее время продолжает творческое сотрудничество с кафедрой. Он заложил основу многих новых научных направлений в области анализа и синтеза электрических цепей и электромагнитных полей.

С 1978 по 1987 год кафедра ТОЭ работала под руководством профессора В.М. Юринова. Затем, с 1987 по 2009 год кафедрой заведовал профессор В.Н. Боронин, а с 2009-го руководство кафедрой осуществляет профессор Н.В. Коровкин.

Рассматривая историю развития науки об электромагнитных явлениях, лежащих в основе ТОЭ, следует отметить, что эта дисциплина принадлежит к тем областям науки и техники, развитие которых идет параллельно с глубоким теоретическим и экспериментальным изучением физических явлений, что находит отражение в строгой системе математических уравнений.

Изучение ТОЭ начинается с основных понятий и законов теории электромагнитного поля, электрических и магнитных цепей, и необходимо опираться на знания, полученные ранее в курсах физики и математики. Внедрение в сознание студентов физического образа мышления необходимо для правильной математической формулировки задач, решаемых в теоретической и прикладной электротехнике. При этом курс ТОЭ служит базовой дисциплиной для большинства технических дисциплин, изучаемых в последующем, а закладываемый здесь физико-математический фундамент — основой для формирования у студентов университета научного мировоззрения.

Формируемое научное мировоззрение обеспечивает критическое отношение к исходным положениям формальных математических методов и исключает возможные ошибки при их формулировании. Понимание природы физических процессов необходимо как для описания их в виде математических моделей, так и для практического использования. Таким образом, глубина изучения студентами физических явлений и законов теоретической электротехники предопределяет их заинтересованность при изучении соответствующих разделов математики и при последующем построении математических моделей.

Создание наукоемких технологий (в частности, нанотехнологий), основанных на новых физических эффектах, также требует прежде всего понимания физической стороны явлений и умения предвидеть, исследовать и рассчитывать влияние множества факторов на новый технологический процесс.

Учет многообразия, взаимосвязей электромагнитных, механических и тепловых явлений при их анализе в различных устройствах выдвинул задачу развития как аналитических методов исследования, так и методов математического и физического моделирования. Это потребовало введения в дисциплину ТОЭ новых разделов и тем самым расширило профессиональный кругозор студентов. Среди таких разделов выделим гибридные методы анализа электромагнитных полей, техническую сверхпроводимость, диагностику и идентификацию технических систем, методы оптимизации электротехнического оборудования.

Развитие математического и физического моделирования дало возможность решать более сложные практические задачи, поскольку аналитические методы не обеспечивали нужной для практики точности и достоверности результатов анализа сложных электромагнитных процессов при необходимости учета множества факторов. Вместе с тем большой объем данных, полученных на физических и математических моделях, составил информационную базу перехода к численным методам расчета электромагнитных процессов в различных устройствах и системах.

Внедрение в инженерную деятельность компьютеров плодотворно повлияло на развитие ТОЭ. Стремление к максимальному использованию их возможностей способствовало разработке новых теоретических подходов как в теории электрических цепей, так и в теории электромагнитного поля. Это обстоятельство привело к пересмотру изложения основных разделов дисциплины ТОЭ — методов расчета электрических цепей и электромагнитных полей — в программе дисциплины, в учебниках, лабораторном практикуме и курсовых работах студентов.

Современные компьютерные и суперкомпьютерные технологии позволяют исследовать самые сложные явления природы. Получаемые визуальные картины изучаемых явлений и процессов помогают объяснять их физическую природу, показывают форму физических полей в разных ситуациях и дают возможность избежать дорогостоящих, опасных, а порой и не реализуемых на практике экспериментов. Тем не менее критический взгляд на результаты численного моделирования, проверка согласованности их результатов с фундаментальными законами не потеряли своей актуальности. Привитие студенту своеобразного научного скептицизма, основанного на ясном понимании физической картины анализируемого явления, также стало одним из важнейших современных направлений в развитии ТОЭ.

Введение в курс ТОЭ технологий компьютерного моделирования физических процессов позволяет сочетать фундаментальную теоретическую подготовку с практическими навыками программирования. При этом программные продукты, предлагаемые студентам в курсе ТОЭ, реально используются в промышленности, что

обеспечивает быструю адаптацию молодых инженеров к решению задач практики.

Изучение в курсе ТОЭ всего многообразия электромагнитных явлений, а также их практических приложений для решения конкретных задач служит на старших курсах основой при изучении процессов в сложных электромагнитных устройствах и системах.

Для сохранения надлежащего статуса дисциплины ТОЭ в системе подготовки инженерных кадров необходима коррекция содержания курса с ориентацией на потребности отечественных науки и производства и мировые факторы развития. Для этого следует дифференцированно и конструктивно варьировать учебную нагрузку: вводить элементы научных исследований с использованием современных программ компьютерного моделирования в курсовые и лабораторные работы; проводить коллоквиумы по отдельным разделам и индивидуальные консультации по наиболее важным темам «Теории электромагнитного поля» и др.

Фундаментальная инженерная дисциплина «**Теоретические основы теплотехники**» (ТОТ) — базовая при подготовке инженерных и научных кадров для энергомашиностроения и теплоэнергетики. Особая значимость этой дисциплины обусловлена тем, что все процессы генерации электрической и тепловой энергии основаны на закономерностях, излагаемых в курсах ТОТ.

Первые лекции по термодинамике на всех отделениях Политехнического института начал читать крупный ученый-теплотехник профессор А.А. Брандт. Начало чтения этих лекций можно отнести к зарождению дисциплины ТОТ в нашем институте. В 1909 год его сменил профессор А.А. Радциг, который одновременно читал курс термических машин и занимал пост декана механического отделения. В 1931 году была организована кафедра термодинамики и теплотехники под руководством профессора Д.Н. Дьякова; в 1939–1941 годах кафедрой заведовал профессор В.С. Жуковский. В конце 1945 года было решено разделить кафедру термодинамики и теплотехники на кафедры общей теплотехники и теоретических основ теплотехники (ТОТ).

Первым заведующим кафедрой ТОТ стал профессор А.М. Гурвич (1909–1963) — блестящий лектор и крупный ученый-теплотехник, известный специалист в области радиационного теплообмена и топочных процессов. Преподаватели кафедры ТОТ вели курсы технической термодинамики, теплопередачи и теории горения на энергомашиностроительном, электромеханическом, механико-машиностроительном, металлургическом и инженерно-экономическом факультетах.

С 1955-го по 1968 год кафедру возглавлял профессор К.И. Страхович (1904–1968). Благодаря чрезвычайной широте научного кругозора, необыкновенной работоспособности К.И. Страхович сочетал научную и педагогическую работу на разных направлениях, в различных организациях и институтах. Он, в частности, в разные периоды времени читал курсы внутренней баллистики, термодинамики, гидромеханики и газодинамики, теории теплообмена, теории и расчета компрессорных машин, процессов и аппаратов глубокого охлаждения, магнитной гидродинамики.

К традиционным для кафедр ТОТ курсам «Техническая термодинамика» и «Теория тепло- и массообмена» К.И. Страхович добавил «Гидрогазодинамику» (по современной терминологии — «Механику жидкости и газа»), что отличает кафедру ТОТ нашего вуза от других родственных кафедр. Такой подход позволяет излагать общепрофессиональные дисциплины для студентов-теплоэнергетиков и энергомашиностроителей с единых позиций.

После кончины К.И. Страховича руководство кафедрой перешло к профессору В.А. Зысину. На протяжении 30 лет начиная с 1947 года В.А. Зысин читал курс технической термодинамики. Эту дисциплину он любил, блестяще ею владел и считал важнейшей в формировании мировоззрения инженера-теплоэнергетика.

С 1978 по 1979 год обязанности заведующего кафедрой исполнял доцент П.М. Михайлов, которого сменил доцент, а впоследствии профессор А.И. Кириллов. С 2004 года кафедрой заведует профессор С.З. Сапожников.

В последние годы кафедра ТОТ существенно расширила область преподавания, охватив курсы неравновесной термодинамики, теории многофазных систем, численного моделирования теплообмена и течения рабочих тел в теплоэнергетических установках и турбомашинах, метрологии в теплотехнических измерениях, а также разделы спецкурсов, посвященные системам микроклимата. Кроме того, кафедра читает крат-

кие, практически ознакомительные курсы для будущих электриков, машиностроителей, экономистов, а с этого учебного года — и строителей. Каждый из курсов имеет свою специфику, но их содержание по-прежнему основано на общности фундаментальных инженерных дисциплин, объединяемых отечественной традицией под аббревиатурой ТОТ.

Дисциплины цикла зародились в конце XVIII — начале XIX века, что было вызвано потребностями промышленной революции. К середине XX века в основном сложились аналитический и экспериментальный методы исследования во всех основных направлениях теплотехнической науки и, как следствие, в учебных курсах. Последующее мощное развитие цифровой вычислительной техники перевело интересы исследователей на недостижимый прежде уровень. Численное моделирование стало всеобъемлющим методом исследования процессов и создания новой техники, вызвав одновременно некоторое «головокружение от успехов». Трудоемкость и консервативность физического эксперимента, сложность и аппаратные ограничения аналитических методов привели к тому, что яркие компьютерные «картинки» не всегда удается понять, обосновать и, главное, убедиться в их адекватности. Об этом упоминалось выше. Здесь же отметим, что сложившееся положение дел потребовало, с одной стороны, сместить акценты в преподавании ТОТ в сторону численных методов, а с другой, — неустанно укреплять базу и методологию натурного теплотехнического эксперимента, приближая, а то и сращивая его с численным моделированием.

На кафедре ТОТ создана учебно-исследовательская лаборатория, оснащенная аэродинамической трубой, комплексами последнего поколения для визуализации течений, исследования теплообмена и цифровой обработки результатов измерений. На базе этой лаборатории и лаборатории численного моделирования впервые в мировой практике создаются учебные лабораторные работы, посвященные верификации численного моделирования, что, помимо методического, имеет важнейшее мировоззренческое значение.

Подводя итоги сказанному, считаем, что наличие в структуре института энергетики и транспортных систем фундаментальных общеинженерных кафедр ТОЭ и ТОТ позволит и в дальнейшем формировать глубокий физико-математический фундамент в процессе подготовки инженерных и научных кадров для нужд электротехники, электромеханики, электроэнергетики, энергомашиностроения и теплотехники. Такая подготовка будет способствовать ориентации студентов на научно-исследовательскую деятельность в сфере прикладной математики, естественных и теоретических наук и новых технологий, а также в области создания современных инженерных производств. Еще более возрастают требования к обеспечению тесной связи звеньев в цепочке «образование — наука — производство», которая в своей основе должна, безусловно, опираться на принципы взаимодействия фундаментальной науки и образования.

Только на основе фундаментальной инженерной подготовки можно обучить и воспитать исследователей и создателей энергетической техники XXI века, обеспечить решение стоящих перед Россией задач.

БОРОНИН Виталий Николаевич — *доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-75-72
tee.dep@eef.spbstu.ru

КИРИЛЛОВ Александр Иванович — *доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) (812) 552-77-73
ai_kirillov@mail.ru, tot@pef.spbstu.ru

КОРОВКИН Николай Владимирович — *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812)552-75-72
tee.dep@eef.spbstu.ru

САПОЖНИКОВ Сергей Захарович — *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-77-73
tfhe1@pef.spbstu.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 378.416

В.В. Амосов, Т.А. Вишневская, С.А. Молодяков,
С.М. Устинов, И.Г. Черноруцкий

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В УЧЕБНЫХ ПЛАНАХ КАФЕДРЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ СПБГПУ

V.V. Amosov, T.A. Vishnevskaya, S.A. Molodyakov,
S.M. Ustinov, I.G. Chernorutsky

NEW TECHNOLOGIES OF COMPUTER SCIENCE IN THE CURRICULUM DEPARTMENT OF INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS SPbSPU

Рассмотрены вопросы изучения современных технологий проектирования устройств вычислительной техники в университете на специальностях программного профиля. На примере нескольких дисциплин продемонстрирован принцип создания лабораторных работ, связанных с изучением программируемой логики и цифровых сигнальных процессоров.

УЧЕБНЫЙ ПЛАН. УЧЕБНАЯ ДИСЦИПЛИНА. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА. УРОВНИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ЯЗЫКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВТ. РЕДАКТОРЫ УРОВНЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ТЕСТИРОВАНИЕ. СИМУЛЯЦИЯ. КО-СИМУЛЯЦИЯ. СОВМЕСТНАЯ РАЗРАБОТКА. МИКРОСХЕМА ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКИ. ЦИФРОВОЙ СИГНАЛЬНЫЙ ПРОЦЕССОР. СРЕДА РАЗРАБОТКИ. СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ.

The problem of the study of modern computing technology at the University at special software profile considered. Using several disciplines shows how to build lab work related to the study of programmable logic, and digital signal processors.

CURRICULUM. COURSE. COMPUTER TECHNOLOGY. LEVELS OF DESIGN. HARDWARE DESCRIPTION LANGUAGES. LEVEL EDITORS OF DESIGN. TESTING. SIMULATION. CO-SIMULATION. THE JOINT DEVELOPMENT. CHIP PROGRAMMABLE LOGIC. DIGITAL SIGNAL PROCESSOR. THE DEVELOPMENT ENVIRONMENT. SYSTEM-ON-CHIP.

Для современной вычислительной техники (ВТ) характерны непрерывное развитие, появление новых устройств и технологий. Программные средства интегрируются с аппаратными. Наблюдается повсеместная доступность любых элементов ВТ. Современный разработчик промышленных средств ВТ должен сочетать владение современными технологиями с широким кругозором, базовыми знаниями и фундаментальной подготовкой. Отсюда возникает вопрос: каким образом организовать учебный процесс, какие дисциплины изучать, какие темы и какие технологии рассматривать в отдельных дисциплинах? Федеральный государственный образовательный стандарт (ФГОС) [1] лишь очерчивает область учебных дисциплин для каждой специальности, наполнение же его содержанием зависит от позиции преподавателей и методологии преподавания, принятой на соответствующих кафедрах университетов. Важно, чтобы каждый преподаватель был вовлечен в процесс обсуждения и разработки учебных планов, поскольку это залог согласованного решения задач воспитания и обучения современного специалиста.

На кафедре информационных и управляющих систем (ИУС) СПбГПУ [2] в области ВТ систематически ведется детальный анализ новых технологий и инструментальных средств их поддержки. Перспективные для индустриальных применений инновации отбираются и ежегодно внедряются в учебный процесс.

С момента создания в 1949 году (переименовывалась в 1952 и 1966 годах) кафедра тесно сотрудничает с флагманами разработки больших и социально значимых проектов в области ВТ (в их числе, ОКБ «Импульс» [3] с 1961, ЗАО «Моторола» с 1995, «ЕМС» с 2009 и др). Ведущие сотрудники промышленных предприятий преподают на кафедре, а преподаватели кафедры непосредственно заняты в высокотехнологичных проектах предприятий. Студенты в рамках учебных практик и научно-исследовательских проектов участвуют в современных исследованиях и промышленных разработках. Важно, что обратной связью подобных контактов является корректировка учебных планов и программ дисциплин с целью учета требований промышленности к знаниям и умениям специалистов, подготавливаемых вузом.

В нашей статье описана организация и содержание отдельных рабочих планов учебных дисциплин (РПУД), связанных с изучением аппаратных средств ВТ.

Хотя на кафедре ИУС готовят бакалавров и магистров по двум направлениям федерального ГОС — 230100.62 «Информатика и вычислительная техника» и 231000. «Программная инженерия», тем не менее затрагиваемые в работе вопросы актуальны для организации учебного процесса и других направлений подготовки программистов.

Учебные планы и федеральный государственный образовательный стандарт

Рассмотрим набор дисциплин, обеспечивающий потребности изучения вычислительной техники. Целью изучения является овладение базовыми знаниями, умениями и компетенциями в областях последних инновационных технологий. Причем под компетенциями понимается способность применять знания и умения при решении профессиональных задач.

В соответствии с ФГОС все дисциплины разделяются на два уровня — общепрофессиональные дисциплины и специальные дисциплины. В дисциплинах первого уровня особое внимание уделяется изучению тем, которые необходимы для тестирования студентов [4]. Задача дисциплин второго уровня связана с изучением и овладением современными технологиями [5].

В табл. 1 представлен примерный список дисциплин, которые посвящены изучению вычислительной техники. Список достаточно условен и может быть расширен такими дисциплинами, как «Операционные системы», «Программирование периферийных устройств» в той части, в которой рассматриваются алгоритмы и модели функционирования аппаратуры. Следует отметить, что в каждой специальной дисциплине содержится материал по инновационным изделиям, архитектурным решениям и технологиям (например, о новых технологиях фирмы National Instruments — в дисциплине «Цифровая обработка сигналов»), которые хотя и упрощают аппаратно-программные решения, но требуют высокого уровня теоретической подготовки студентов.

Табл.1 иллюстрирует применение новых технологий в перечне учебных курсов. Следует заметить, что в учебных планах основное внимание уделено изучению базовых дисциплин, к которым относятся «Электротехника, электроника и схемотехника», «ЭВМ и периферийные устройства», «Микропроцессорные системы», «Архитектура вычислительных систем», «Сети и телекоммуникации». Знания, полученные студентами при изучении указанных дисциплин, используются при обучении на старших курсах по дисциплинам, которые связаны с проектированием и исследованием информационных и управляющих систем. Особенностью кафедры ИУС можно считать ориентацию новых учебных планов, созданных в соответствии с требованиями ФГОС, на подготовку студентов по магистерским программам «Технология разработки программных систем» и «Технология разработки и сопровождения качественного программного продукта». Поэтому даже при изучении дисциплин аппаратного цикла основное внимание уделено программным моделям, алгоритмам, библиотекам программ, поддерживающим разработку и проектирование устройств ВТ.

При изучении дисциплин аппаратного цикла, в равной мере как теоретического и программного циклов, важны элементы интереса и самостоятельной работы студентов. Задача преподавателей заключается не столько в пробуждении интереса путем нахождения актуальных тем дипломных и курсовых работ, сколько в разработке методики самостоятельной работы, которая включает целый комплекс вопросов, учебных материалов, в том числе руководств к средствам разработки.

Таблица 1

Список дисциплин, связанных с изучением аппаратных средств вычислительной техники, по ФГОС для направления подготовки 230100 кафедры ИУС

№	Дисциплина	Семестр	Всего час.	Изучаемые инновации ВТ
1	Электротехника, электроника и схемотехника	2, 3, 4	396	Редакторы уровн. проектир. HDL. Программирование процессов. Совместная разработка ПО и аппаратуры [6] Co-simulation [7] SystemC [8]...
2	ЭВМ и периферийные устройства	3, 4	252	Отладочные модули ЦСП [9] VisualDSP [10] OpenMP [11] OpenCV [12] DirectSound, SSE...
3	Программное обеспечение POSIX GNU/Linux	3	126	Программирование ядра GNU/Linux, драйверы [13]
4	Микропроцессорные системы	5	144	Технология разработки ПО и систем на ЦСП [9, 10]
5	Архитектура вычислительных систем	5, 6	198	Технология имитационного моделирования. Распределенные вычислительные системы [14]
6	Сети и телекоммуникации	7,8	288	Моделирование в MatLab Simulink [15]. ПО для беспроводных систем с Bluetooth [16]
7	Технические средства АСОИУ	7	90	USB-камеры. Технология CUDA [17] MatchCad [18] ...
8	Цифровая обработка сигналов	5,6	180	Модули системы сбора данных National Instruments и среда разработки LabVIEW [19]
9	Проектирование систем реального времени	10	108	Отладочные модули Actel/ ARM. Встроенные ОС Linux [13]
10	Проектирование систем передачи данных	10	108	Проектирование новых протоколов систем телекоммуникаций
11	Технология проектирования «Система на кристалле»	11	72	Технология разработки [6]. Отладочные модули. Quartus [20]
12	Оптические процессоры	11	72	Среда моделированияGLSD [21]

Для иллюстрации изложенных тезисов рассмотрено несколько программ дисциплин первого и второго уровней подготовки студентов, где новые инновационные технологии вычислительной техники изучаются и осваиваются в учебном процессе.

Современные технологии проектирования в дисциплине «Электротехника, электроника и схемотехника»

Базовая, общепрофессиональная дисциплина «Электротехника, электроника и схемотехника» изучается в 2, 3, 4 семестрах, планы ее

изучения студентами достаточно подробно разработаны [1]. Однако при сохранении основных тем изучения найдены возможности рассмотрения новых технологий проектирования ВТ. Если во втором семестре в практических занятиях и лабораторных работах изучаются традиционные темы, то в последующих семестрах в лабораторный практикум введены новые современные средства разработки [6].

Очень важно при изучении любой дисциплины выйти на современный уровень ее развития. Вооружить студентов знаниями и навыками, при которых они в рамках научно-исследовательской работы на кафедре или у себя дома могли бы заниматься творчеством (в данном случае — создавать современные программно-аппаратные комплексы). Уделяя достаточное внимание основам промышленной электротехники и электроники, акцент в дисциплине сделали на схемотехнику основных узлов ВТ, редакторы системного и архитектурного уровней проектирования, языки проектирования (VHDL, Verilog HDL, SystemC), синтезируемость HDL-кода, инструментарий и траектории проектирования фирм Mentor Graphics, Altera, Cadence Design Systems, Synopsys и др., конфигурирование (программирование) проектов разной сложности на ПЛИС.

Каждая лабораторная работа — это создание проекта, сначала аппаратного, в дальнейшем программно-аппаратного (от простого к сложному, с охватом все большего числа уровней проектирования).

Используемая последовательность этапов проектирования (маршрут проектирования) сходна с практикой, применяемой в промышленности [6]: сначала разработка спецификации и функционального теста, затем системный, архитектурный и RTL (Register Transfer Level) уровни, после с помощью синтеза выходим на Gate-уровень, после которого возможны размещение и трассировка с получением временной модели проекта (рис. 1). Необходимо отметить, что при любой доработке проекта на каждом уровне с помощью разработанных тестов, симуляции и ко-симуляции [7] проводится тестирование как HDL-проекта, так и тестирование программ, написанных для этого проекта.

В результате использования современных языков моделирования (HDL) при проектировании узлов ВТ студенты получают опыт программирования параллельных и асинхронных взаимодействий процессов.

В рамках лабораторных работ студенты реализуют сначала аппаратно (VHDL-код), а затем

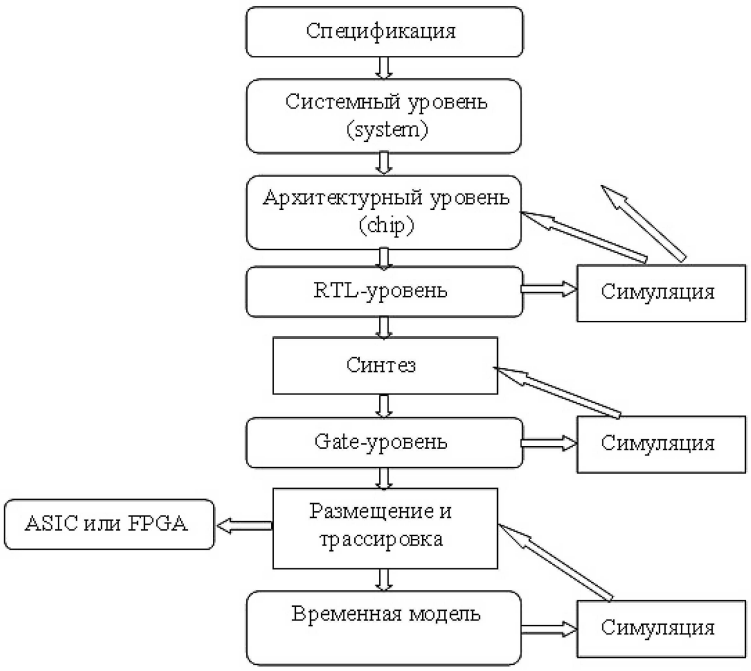


Рис. 1. Уровни проектирования устройства на ПЛИС

программно один и тот же алгоритм (например, LIFO, FIFO, CACHE, видеопамять ...). При программной реализации этот алгоритм описывается программой в командах данного процессора, которая размещается в VHDL-модели памяти. При этом используются либо поведенческая, либо структурная VHDL-модель процессора, VHDL-модель памяти и тактового генератора. Тестирование при аппаратной реализации алгоритма проводят с помощью симуляции, а при программной реализации с помощью ко-симуляции.

Поскольку современный разработчик программно-аппаратных комплексов должен уметь программно и аппаратно реализовать алгоритмы из спецификации, а также находить оптимальное сочетание программно и аппаратно реализованных алгоритмов, то становится актуальным изучение языка SystemC [8], реализованного в виде C++ библиотеки.

Студенты второго курса одновременно с обучением программированию на C++ в рамках дисциплины «Объектно ориентированное программирование» получают возможность в той же среде Visual C++ в рамках дисциплины «Электротехника, электроника и схемотехника» разработать SystemC-модели узлов ВТ. В рамках лабораторного практикума рассматривается вопрос синтеза этих моделей через переход к соответствующим VHDL- или Verilog HDL-моделям. Таким образом, дисциплина позволяет реализовать актуальную задачу совместной разработки программного обеспечения и аппаратуры.

Рассмотрим лабораторную работу «Таймер», в которой студенты знакомятся с инструментом HDL-дизайна. Инструмент позволяет описать проект на системном и архитектурном уровнях с помощью соответствующих редакторов, а также сгенерировать код по любому из языков проектирования.

Спецификация проекта «Таймер». Таймер выводит временные данные посредством двух шин на четыре бита, представляющих значения десятков и единиц (рис. 2). Имеется выход, который запускает звуковой сигнал (Alarm). Входные сигналы представлены шиной данных на 10 разрядов и управляющими входами — Start, Stop, Reset и Clock.

Для начала работы необходимо установить таймер в рабочее положение: подать на информационный вход число и нажать на кнопку Start. Работа таймера состоит в том, что с каждым синхроимпульсом Clock из числа вычитается единица. По завершении счета, т. е. при уменьшении числа до нуля, таймер выдает соответствующий сигнал (Alarm). Предусмотрена возможность временно приостановить работу таймера.

Таймер содержит входы: Start — для начала работы таймера; Stop — для временной остановки; Reset — для сброса значения таймера; d — информационный вход; Clk — синхронизация. На выходе получаем значение таймера (High — десятки, Low — единицы) и сигнал о завершении счета — Beep.

Таймер состоит из счетчика (Counter) и управляющего им устройства (Control). На вход тайме-

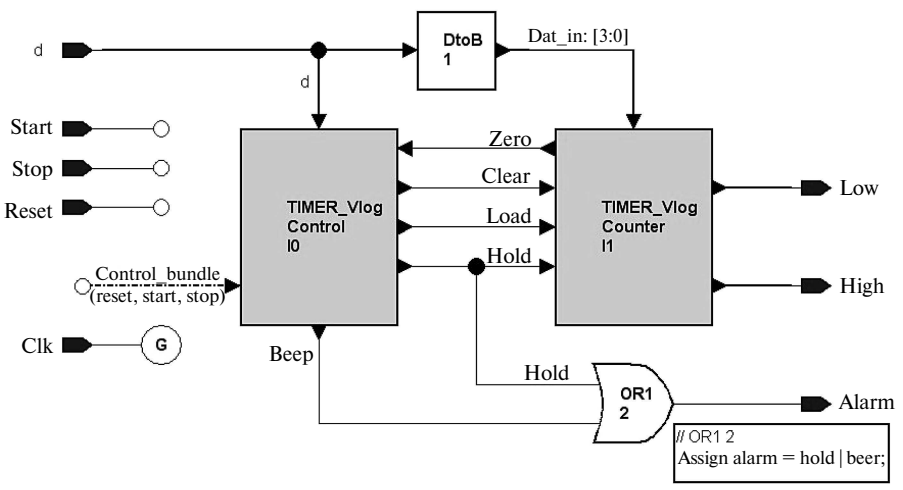


Рис. 2. Блок-схема таймера

ра поступает десятичное число d, поэтому необходим блок перевода его в двоичную систему (DtoB). Устройство управления (Control) устанавливает (сигнал Load) и сбрасывает (сигнал Clear) значение счетчика, сигнализирует о начале и остановке счета (сигнал Hold), подает сигнал о его завершении (Beep). Счетчик (Counter) выдает текущее значение, а также сообщает устройству управления о завершении счета (сигнал Zero). Блок DtoB конвертирует десятичное число в двоичное.

В ходе выполнения лабораторной работы студенты последовательно продвигаются по уровням и фазам проектирования (см. рис. 1). С помощью редактора Block Diagram создают описание проекта на системном уровне (см. рис. 2). С помощью редактора состояний State Diagram описывают блок Control на архитектурном уровне. Более подробно описывается его составное состояние Count. В результате получают HDL-код устройства.

В двух следующих лабораториях полученный проект тестируется с помощью симуляции (используется редактор алгоритмов Flow Chart [22]) и конфигурируется в заданную ПЛИС с помощью синтеза. Микросхемы ПЛИС, в которые загружается разработанный проект, расположены на отладочных модулях (табл. 2).

Все последующие лабораторные работы выполняются с применением вышеописанных редакторов системного и архитектурного уровней, но это не исключает возможности описания отдельных блоков проекта на RTL-уровне с помощью языков проектирования (VHDL, Verilog HDL).

Применение отладочных модулей цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) в дисциплинах «ЭВМ и периферийные устройства» и «Микропроцессорные системы»

Дисциплина «ЭВМ и периферийные устройства» изучается студентами на втором курсе. В первом семестре студенты приобретают базовые знания об ЭВМ, которые закрепляются в лабораторных работах практикой низкоуровневого программирования на языке Ассемблер. Во втором семестре изучаются современные процессоры и их окружение, в первую очередь — мультимедийное. Лабораторные работы посвящены освоению работы с периферией и программированию медийного ЦСП типа BlackFin [10]. Для самостоятельной разработки и отладки программ доступно средство VisualDSP++[10].

Дисциплина «Микропроцессорные системы» изучается в 5 семестре. В ней используются знания, приобретенные студентами в курсе «Операционные системы» (включая встроенный Linux). Итог практической работы студентов — курсовой проект, который предусматривает разработку программных средств для ЦСП. В этом случае используются отладочные модули не только с целочисленными процессорами BlackFin, но и с процессорами, работающими с числами с плавающей запятой, типа SHARC [10].

В табл. 3 охарактеризованы процессоры, которые используются в практических работах. Это современные процессоры фирмы Analog Devices [10]. Практически все современные технологии ВТ нашли свое применение в ЦСП: конвейерное выполнение команд, длинное командное слово,

Таблица 2

Отладочные модули микросхем программируемой логики, используемые в лабораторных работах.

№	Тип ПЛИС модуля	Элементы на плате
1	Altera Cyclone II Starter Development Kit DE1 50 МГц	Память – 8-Mb SDRAM, 512-Kb SRAM, 4-Mb flash; USB-Blaster; audio-кодек 24-bit coder/decoder; коннекторы – VGA, RS-232, PS/2, два 40-pin внешних порта
2	Altera Cyclone III Starter Development Kit DE1 50 МГц	
3	Altera Development Kit, Stratix IV	Память – 2-Gb DDR3 SDRAM, 72-Mb QDR II SRAM; USB-Blaster; коннекторы: 10/100/1000 Ethernet, 36 transceiver channels; LCD дисплей

одна команда — много данных (Single Instruction Multiple Data SIMD), кэширование команд и данных, два уровня защиты (user/supervisor). Среди системных ресурсов следует выделить внутреннюю и внешнюю память (до 4ГБ), таймеры, контроллеры прерываний, контроллеры прямого доступа к памяти (ПДП) и flash-память, в которой может находиться загрузчик и встраиваемая операционная система. ЦСП в зависимости от типа могут включать разные интерфейсы внешних устройств (так ЦСП ADSP-BF537 включает полный набор интерфейсов).

Для разработки и отладки программ ЦСП компании Analog Devices используется интегрированная среда разработки проектов VisualDSP++ [10]. Эта среда включает ассемблер, архиватор (средство создания библиотек), компоновщик, загрузчик, потактовый симулятор уровня команд, компилятор C/C++ и библиотеку исполняемых функций C/C++, включающую функции ЦОС. При отладке C/C++ и ассемблерных программ в отладчике среды VisualDSP++ можно: просматривать смешанный код на C/C++ и ассемблере; устанавливать точки останова; производить трассировку выполнения команд; заполнять, выгружать и графически отображать содержимое памяти; выполнять отладку на уровне исходной программы.

Например, интересен материал лабораторной работы, посвященной особенностям потокового программирования звука. Схема взаимодействия отдельных элементов ЦСП, размещенного на отладочном модуле EZ-KIT Lite ADSP-BF533, и ЭВМ приведена на рис. 3. Звук на отладочный модуль подается с выхода SB-бластера ЭВМ. В последовательном кодеке производится его оцифровка и с частотой 44 кГц стереоотсчеты поступают в последовательный интерфейс SPORT. С выхода SPORT по сигналу прерывания в режиме ПДП отсчеты записываются в буферную память процессора. Для вывода отсчетов достаточно переписать их в другой участок буферной памяти, и они через второй канал интерфейса SPORT и кодек будут поступать на динамик. Студент, используя подготовленный ранее шаблон программы, должен разработать (в среде VisualDSP++) программу обработки потока отсчетов. В шаблоне программы проводятся операции по инициализации элементов, но звуковые отсчеты не обрабатываются. Типовое задание: при превышении порога громкости отключить звук. Особенностями работы являются: предварительное тестирование диапазона изменения амплитуды отсчетов и разработка на основе результатов тестирования программы, время исполнения которой ограничено приходом следующего отсчета.

На основе использования отладочных модулей ЦСП разработана целая серия лабораторных работ, которая включает не только за-

Таблица 3

Цифровые сигнальные процессоры, используемые в лабораторных работах

Тип ЦСП	Тактовая частота	Элементы ЦСП	Интерфейсы
ЦСП целочисленные 16/32-bit Blackfin			
ADSP-BF533	600 MHz	Внутренняя память; 32-разрядные таймеры; сторожевые таймеры; контроллер ПДП; внутренний и внешний контроллеры прерываний	Параллельный порт PPI; последовательные интерфейсы SPI, Ethernet, SPORT, и UART (с поддержкой IrDA); JTAG интерфейс; программируемые порты ввода-вывода общего назначения GPIO
ADSP-BF535	200 MHz		
ADSP-BF537	600 MHz		
ADSP-BF561 two cores	600 MHz		
ЦСП с плавающей запятой 32/64-bit SHARC			
ADSP-21160	100 MHz	Таймер; контроллер ПДП; контроллер прерываний; двухпортовое запоминающее устройство SRAM	Последовательные порты SPORT; link-порты; JTAG-интерфейс; порт для взаимодействия с внешней памятью; многопроцессорный интерфейс
ADSP-21161	100 MHz		

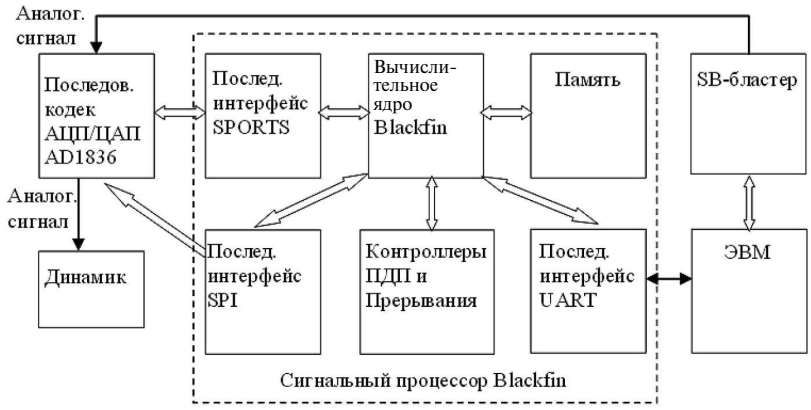


Рис. 3. Структурная схема лабораторной установки с использованием отладочного модуля EZ-KIT Lite ADSP-BF533

дания по изучению среды разработки VisualDSP и элементов процессоров, но и сложные итоговые задания, например: проигрывание Wav-файла через ЦСП, генерацию звука в ЦСП, передачу отсчетов в ЭВМ и проигрывание звука. Отладочные модули процессоров ADSP-BF533 и ADSP-BF561 имеют video-кодеки, поэтому студенты по своему желанию могут взять задания, связанные с обработкой потокового video.

В итоге выполнения комплекса работ по изучению и программированию ЦСП студенты осваивают не только новую среду разработки и современные процессоры, но и приобретают умения работать с сигналами в реальном масштабе времени, использовать элементы встраиваемых операционных систем. Все это формирует навыки низкоуровневого программирования на языках C/C++, ассемблера и обосновывает полезности их интеграции.

Применение отладочных модулей программируемой логики в дисциплине «Технология проектирования “Система на кристалле”»

Дисциплина «Технология проектирования “Система на кристалле”» изучается студентами в первом семестре шестого курса. Она посвящена разработке программно-аппаратных комплексов системного уровня интеграции с использованием ПЛИС. Студенты получают навык конфигурирования устройства или процессора для целевой ПЛИС.

Лабораторный практикум включает четыре основных работы. В лабораторной работе № 1 предусматривается создание простой системы (счетчик событий) на кристалле платформы Altera. Студенты знакомятся со средой разработки Quartus II [20], изучают макетную плату Cyclone III (табл.2). В работе № 2 создается модель процессора Nios в среде Quartus. Студенты знакомятся со средой SOPC Builder [20], осваивают конфигурирование модели процессора Nios II для целевой макетной платы. Работа № 3 посвящена вопросу встраивания криптоядра в систему на основе процессора Nios II. В работе № 4 осуществляется встраивание ядра Linux, конфигурирование Microtronix Linux для использования с процессором Nios II, развертывание полученной системы на макетной плате, отладка собственного программного модуля.

Итоговым заданием является создание калькулятора двоичных чисел с выводом на HEX-дисплей. Для реализации проекта используется отладочный модуль Cyclone III (см. табл. 2). Ввод чисел осуществляется при помощи кнопок и переключателей на плате. Программа должна быть реализована в среде Nios II IDE с использованием языков Verilog/VHDL.

Во всех дисциплинах V и VI курсов, включая описанные выше, используются новые знания и технологии, полученные в процессе выполнения грантов и хоздоговорных работ. Так, при изучении дисциплины «Оптические процессоры» рассматриваются особенности проектирования и применения на крупнейших отече-

ственных радиотелескопах гибридных систем, включающих оптические процессоры, ПЛИС и ЦСП [23, 24].

В статье рассмотрены планы изучения дисциплин аппаратного цикла на специальностях программного профиля кафедры ИУС СПБГПУ. В учебные планы большинства традиционных и новых дисциплин введены материалы по аппаратным и технологическим инновациям. На примере нескольких дисциплин проиллюстрирован процесс изучения новых технологий. Лабораторные работы, построенные на основе применения современной аппаратуры и новых средств моделирования и разработки, не только дают возможность обучить базовым знаниям и компетенциям, но актуальны и интересны для студентов.

Учебные планы предусматривают изучение таких инноваций, как автоматизированное проектирование программно-аппаратных комплексов на основе использования редакторов уровня проектирования, HDL-языков моделирования, VHDL-моделей, симуляции, косимуляции и конфигурирования в ПЛИС на отладочном модуле; проектирование систем на кристалле; программирование ЦСП с использованием среды разработки VisualDSP, встроенной операционной системы Linux и модулей отладки; программирование с привлечением библиотек DirectSound, OpenCV, OpenMP, технологии CUDA и др. Изложенная методология может быть рекомендована как при определении набора изучаемых дисциплин, так и при насыщении лекционных и практических занятий. Преподаватели кафедры систематически анализируют и используют позитивный опыт других кафедр программистских специальностей нашего института [25] и других вузов Российский Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российское образование. Федеральный портал.— [Электронный ресурс].— URL: http://www.edu.ru.

2. Сайт кафедры информационных и управляющих систем СПбГПУ.— [Электронный ресурс].— URL: ics.ftk.spbstu.ru.

3. **Черноруцкий, И.Г.** Кафедра ИУС — вчера, сегодня, завтра [Текст] / И.Г. Черноруцкий // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— № 3(41) 2005.— С. 10–14.

4. Тестирование при государственной аккредитации.— [Электронный ресурс].— URL: att.nica.ru.

5. **Тучкевич, Е.И.** Технология формирований ключевых профессиональных компетенций при подготовке магистров по направлению «Дизайн» [Текст] / Е.И. Тучкевич // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— № 4 (110) 2010. — С. 356–360.

6. **Амосов, В.В.** Схемотехника и средства проектирования цифровых устройств [Текст]. / В.В. Амосов // СПб.: БХВ-Петербург, 2007.— 542 с. — ISBN: 978–5-9775–0018–0.

7. Co-simulation — overview [Электронный ресурс].— URL: www.flowmaster.com/

8. Standards SystemC [Электронный ресурс].— URL: www.accellera.org/downloads/ standards/systemc

9. Texas Instruments. Digital Signal Processors [Электронный ресурс].— URL: www.ti.com/lsds/ti/dsp/overview.page

10. Описания сигнальных процессоров и среды разработки VisualDSP++ фирмы Analog Devices. [Электронный ресурс].— URL: www.analog.com/dsp

11. OpenMP. Specifications. [Электронный ресурс].— URL: openmp.org/wp/

12. OpenCV. Open Source Computer Vision Library. [Электронный ресурс].— URL: opencv.org/

13. Introduction to GNU/Linux. [Электронный ресурс].— URL: www.ubuntugeek.com/introduction-to-gnulinux-pdf-guide.html

14. **Радченко, Г.И.** Распределенные вычислительные системы [Текст] / Г.И. Радченко // Челябинск: Фотохудожник, 2012. — 184 с.

15. MATLAB and Simulink. [Электронный ресурс].— URL: www.matlab.ru; www.mathworks.com

16. Спецификация беспроводных персональных сетей Bluetooth. [Электронный ресурс]— URL: www.bluetooth.com

17. **Григорьев, А.В.** Параллельное программирование с использованием технологии CUDA / А.В. Григорьев, И.С. Еремеев, М.И. Алексеева [Электронный ресурс].— URL: edu.chpc.ru/cuda/main.html

18. Руководство пользователя Mathcad. [Электронный ресурс].— URL: http://www.exponenta.ru/soft/ mathcad/usersguide/0.asp

19. Модули системы сбора данных National Instruments и среда разработки LabVIEW [Электронный ресурс].— URL: russia.ni.com/

20. Описания отладочных модулей, среды разработки Quartus, системы проектирования SOPC Builder фирмы Altera [Электронный ресурс].— URL: www.altera.com/.

21. Среда моделирования GLAD — General Laser Analysis and Design. [Электронный ресурс].— URL:

www.aor.com

22. Редактор алгоритмов Flow Chart. [Электронный ресурс].— URL: flowchart.com

23. **Молодяков, С.А.** Системное проектирование оптоэлектронных процессоров обработки сигналов [Текст]. / С.А. Молодяков.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— 226 с.

24. **Молодяков, С.А.** Оптоэлектронные процессоры с ПЗС-фотоприемниками. Конвейерная обработка сигналов [Текст]. / С.А. Молодяков // Информационно-управляющие системы.— 2008.— № 6.— С. 2–8.

25. Сайт кафедры компьютерных систем и программных технологий СПбГПУ [Электронный ресурс].— URL: kspt.ftk.spbstu.ru.

АМОСОВ Владимир Владимирович — *кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 21, ИИТУ, Санкт-Петербург, Россия
(812) 297-16-00
amosovvlvl@yahoo.com

ВИШНЕВСКАЯ Татьяна Александровна — *доцент кафедры информационных и управляющих систем института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 21, ИИТУ , Санкт-Петербург, Россия
(812) 297-16-00
vish@ics2.ecd.spbstu.ru

МОЛОДЯКОВ Сергей Александрович — *доктор технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 21, ИИТУ, Санкт-Петербург, Россия
(812) 297-16-00
molod@cef.spbstu.ru

УСТИНОВ Сергей Михайлович — *доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Политехническая ул., 21, ИИТУ, Санкт-Петербург, Россия
(812) 297-16-00
usm50@yandex.ru

ЧЕРНОРУЦКИЙ Игорь Георгиевич — *доктор технических наук, профессор, директор института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251, Политехническая ул., 21, ИИТУ, Санкт-Петербург, Россия
(812) 297-16-28
igcher@robotek.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 378

Е.Г. Поршнева, А.Ю. Туманов

МЕТОДИКА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ СТУДЕНТОВ ПО ФИЗИКЕ ПРИ ЗАЧИСЛЕНИИ НА ФАКУЛЬТЕТ ВОЕННОГО ОБУЧЕНИЯ СПБГПУ

E.G. Porshneva, A.Yu. Tumanov

A METHOD FOR THE ANALYSIS OF PHYSICS APTITUDE TEST RESULTS FOR STUDENTS ADMISSION TO THE MILITARY TRAINING DEPARTMENT OF SAINT-PETERSBURG STATE POLYTECHNIC UNIVERSITY

В статье рассмотрена методика анализа результатов тестирования студентов по физике при зачислении на факультет военного обучения.

ТЕСТИРОВАНИЕ. ВОЕННАЯ КАФЕДРА. МЕТОДИКА. ВЕСОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ.

The article describes a method for the analysis of Physics aptitude test results for students admission to the military training department.

TESTING. MILITARY TRAINING DIVISION. METHOD. WEIGHT FACTORS.

В связи с ограниченным приемом студентов факультет военного обучения производит отбор студентов из желающих пройти подготовку для получения звания офицера запаса. На первом этапе анализируется учебная успешность студентов на базовом факультете. К дальнейшему конкурсу допускаются хорошо успевающие студенты. Предварительный отбор также включает результаты медицинского освидетельствования и профессионального психологического отбора [1].

Поскольку на факультете военного обучения СПбГПУ подготовка офицеров запаса ведется по военно-техническим и специальным дисциплинам, логически важно установить уровень усвоения тех разделов физики, на принципах которых спроектирована военная техника.

Далее проверяется физическая подготовка (подтягивание, бег), в результате чего производится ранжирование участвующих в конкурсе. При этом к сумме баллов, полученной в результате тестирования, прибавляется оценка физической подготовленности кандидата и в обязательном порядке учитывается его категория профессиональной пригодности [1].

Таким образом, возникают следующие задачи: во-первых, разработать тесты; во-вторых, определить количество тестовых заданий для объективной оценки уровня остаточных знаний; в-третьих, сопоставить результаты тестирования и физической подготовки и, наконец, разработать методику анализа результатов тестирования. Решению поставленных задач и посвящена предлагаемая статья.

Тестирование — метод диагностичного контроля знаний, умений и навыков обучающихся с помощью тестов [2]. Тесты позволяют объективно и независимо от преподавателя измерить качественную и количественную оценку уровня учебных достижений учащихся по соответствующим учебным курсам и дисциплинам. Основная цель тестирования по физике как одного из способов определения показателей допуска студентов к зачислению на военную кафедру заключается в том, чтобы с помощью тестовых заданий за короткое время качественно сравнить знания как можно большего количества испытуемых, поступающих на военную кафедру.

При составлении тестов была применена форма тестовых заданий на множественный выбор (задания с закрытой формой), поскольку задания с большим числом вариантов ответов имеют меньшую вероятность угадывания, а так-

же наиболее удобны для автоматизированной обработки и хранения результатов тестирования.

Кроме того, был применен нормативно-ориентированный подход к созданию тестов, позволяющий сравнить учебные достижения некоторой выборки испытуемых, используя такую последовательность: задания → ответы → выводы о знаниях испытуемого → рейтинг испытуемого. Математические методы, применяемые при конструировании и оценке качества нормативно ориентированных тестов, рассчитаны на модель нормального распределения и основываются на корреляционном анализе. Тестовые задания отобрали с высокой дифференцирующей способностью (хорошо отделяющие «слабых» испытуемых от «сильных»), а также в соответствии с критериями валидности (достоверности), надежности, однозначности, дифференцирующей способности, простоты, определенности и др.

После проведения тестирования и получения его результатов был проведен анализ распределения в координатах «количество тестируемых — количество правильных ответов», соответствующего нормальному распределению.

При составлении вариантов тестовых заданий для студентов, изъявивших желание пройти военную подготовку на кафедре военно-воздушных сил, был проведен статистический анализ результатов тестирования в 2012 году (7 вариантов по 25 вопросов, количество испытуемых — 309 человек с различных факультетов СПбГПУ).

Были вычислены следующие параметры:

1) коэффициент сложности K_c (отношение количества $N_{\text{нереш}}$ испытуемых в каждой группе, не решивших данное задание, к общему числу N испытуемых в данной группе). На этом этапе необходимо было исключить из теста «легкие» вопросы (значение K_c близко к нулю) и «сложные» вопросы (значение K_c близко к единице);

2) дискриминационный индекс, служащий индикатором способности конкретного вопроса разделять «сильных» и «слабых» студентов. Значения этого параметра лежат в диапазоне между −1 и +1. Его отрицательное значение служит поводом для отбраковки вопроса, так как означает, что на данный вопрос теста слабые студенты отвечают лучше, чем сильные;

3) дискриминационный коэффициент — мера, позволяющая оценить качество вопроса. Он представляет собой коэффициент корреляции между баллами, полученными тестируемым по конкретному вопросу, и его оценкой за прохождение всего теста. Отрицательное значение этого коэффициента также свидетельствует о некорректности анализируемого вопроса с точки зрения правильности оценки уровня усвоения учебного материала.

На основе этих данных проанализировано качество тестовых вопросов с точки зрения их эффективности для оценки уровня учебных достижений испытуемых. Экспертной комиссией факультета военного обучения были отбракованы «сложные» вопросы, на которые ответили менее 10 % испытуемых ($K_c \le 0{,}1$), и «легкие» вопросы, на которые ответили более 80 % испытуемых ($K_c \ge 0{,}8$).

В результате проведенного анализа были составлены 5 вариантов тестов по 23 вопроса с возрастающей трудностью тестовых заданий.

С точки зрения математической обработки результатов целесообразно определение весовых коэффициентов для каждого вопроса. С этой целью для каждого варианта тестовых заданий был применен экспертный метод. Одним из эффективных методов формирования групповой оценки экспертов является метод Дельфы [3]. Его особенности:

ответы на поставленные вопросы выражаются в виде числа;

эксперты обладают достаточной информацией для того, чтобы дать оценку;

ответ на каждый из вопросов обосновывается экспертом.

Была создана экспертная комиссия в количестве 10 человек и проведена корректная обработка и анализ экспертной информации.

Опрос экспертов проводился в очной письменной форме анонимно (для исключения влияния экспертов друг на друга), многоэтапно (после каждого тура опроса все эксперты знакомились с мнениями друг друга и при необходимости представляли письменные обоснования своих точек зрения, после чего могли пересматривать свою точку зрения) и с осуществлением контроля на предмет согласованности мнений экспертов.

Непосредственное измерение весовых коэффициентов производилось по шкале порядка. Значения этих коэффициентов рассчитываются по формуле [3]

$$g_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} G_{i,j}}{\sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{n,m} G_{i,j}}, \qquad (1)$$

где n — количество экспертов; m — число «взвешиваемых» показателей; $G_{i,j}$ — коэффициент весомости j-го показателя в баллах, данный i-м экспертом.

После каждого тура опроса осуществляется контроль и проверяется согласованность мнений экспертов до тех пор, пока степень этой согласованности окажется удовлетворительной. За меру согласованности принимается так называемый коэффициент конкордации, вычисляемый по формуле [3]

$$W = \frac{12S}{n^2\left(m^3 - m\right)}, \qquad (2)$$

где S — сумма квадратов отклонений суммы рангов каждого объекта экспертизы от среднего арифметического рангов; n — число экспертов; m — число объектов экспертизы. В зависимости от степени согласованности мнений экспертов коэффициент конкордации может принимать значения от нуля (при отсутствии согласованности) до единицы (при полном единодушии). Расчетный коэффициент конкордации равен 0,9, что позволило сделать вывод об удовлетворительной степени согласованности мнений экспертов.

Для сопоставления результатов тестирования и подготовки по физике максимальный балл, который может набрать студент в указанных способах проверки, принят равным 180 [4], а значения весовых коэффициентов — кратными трем: 3 балла (самый простой вопрос, на который отвечает большинство испытуемых), 6 баллов, 9 баллов и 12 баллов (самый сложный вопрос, на который отвечает меньшинство испытуемых). Методом экспертных оценок были присвоены весовые коэффициенты каждому вопросу пяти вариантов тестовых заданий в зависимости от трудности вопросов. Стоит отметить, что распределение весовых коэффициентов у разных вариантов одинаковое, что способствует повышению объективности обработки результатов тестирования.

Таким образом, после проведения тестирования в 2012 году, статистической обработки его результатов и применения экспертного метода для определения значений весовых коэффициентов получены следующие результаты:

Диапазон количества ответивших студентов, %	*Весовые коэффициенты, баллы*
0–50	12
51–60	9
61–70	6
71–100	3

При этом распределение весовых коэффициентов по вопросам во всех пяти вариантах оказалось таким:

Вопросы 1–7	3 балла
Вопросы 8–11	6 баллов
Вопросы 12–14	9 баллов
Вопросы 15–23	12 баллов

Предлагаемая методика позволит уже в 2013 году провести объективный анализ результатов тестирования по физике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Приказ** Министра обороны РФ № 666, Минобрнауки РФ № 249 от 10.07.2009 г. «Об организации деятельности учебных военных центров, факультетов военного обучения и военных кафедр при федеральных государственных образовательных учреждениях высшего профессионального образования / Зарегистрировано в Министерстве юстиции РФ 01.09.2009 № 14677.

2. **Никифоров, В.И.** Теория и практика высшего профессионального образования. Термины, понятия, определения / В.И. Никифоров, А.И. Сурыгин.— [Электронный ресурс].— URL:http://moodle.spbstu.ru/file.php/63/.— 2009.

3. Dopolnitelnye_materialy/Slovar_01sen10.pdf.— (дата обращения: 20.01.2011). Экспертный метод [Электронный ресурс].— URL:. http://www.klubok.net/pageid432.html.– Дата обращения: 21.01.2013.

4. **Приказ** Министра обороны Российской Федерации № 200 от 21 апреля 2009 года «Об утверждении Наставления по физической подготовке в Вооруженных силах Российской Федерации» [Электронный ресурс].— URL: http://www.rostodosaaf.ru/images/img2/nfp2009.pdf.— Дата обращения: 21.01.2013.

ПОРШНЕВА Елена Геннадьевна — *кандидат педагогических наук, преподаватель военной кафедры военно-воздушных сил института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-87-29
a_porshneva@mail.ru

ТУМАНОВ Александр Юрьевич — *кандидат технических наук, доцент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, ул. Политехническая, д.29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 294-22-62
kaf-uzchs@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

Научное издание

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 2 (171) 2013

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

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

Научный редактор, корректор канд. техн. наук *Л.В. Спиридонова*
Технический секретарь *О.А. Матенёв*
Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой*

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail:ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 28.06.2013. Формат 60□84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 42,25. Тираж 1000. Заказ 189.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Адрес университета и издательства:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Он 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.) и распространяется по подписке агентства «Роспечать» (индекс 18390).

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ЭКОНОМИКА; УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ; ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ФИЗИКА; МАТЕМАТИКА; ЭНЕРГЕТИКА; МАШИНОСТРОЕНИЕ; ТРАНСПОРТ; МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ; ПЕДАГОГИКА; ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ.

Периодичность выхода журнала – 4 номера в год.

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

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Объем статей докторов наук, профессоров, докторантов, соискателей ученой степени доктора наук, как правило, 12–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий не должно превышать 4, таблиц — 3, литературных источников — 15.

2. Объем статей преподавателей, сотрудников, соискателей ученой степени кандидата наук, как правило, — 8–15 страниц формата А-4, объем статей аспирантов — 8 страниц формата А-4. Количество рисунков не должно превышать трех, таблиц — двух, литературных источников — десяти.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы.

4. Число авторов статьи — не более трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул — в редакторе MS Equation. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

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.

6. Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

2.2. Представление материалов

Вместе с материалами статьи в редакцию должны быть обязательно представлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация статьи (2–3 предложения) на русском и английском языках;
- ключевые слова статьи (5–7 слов) на русском и английском языках;
- сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;
- рецензия на имя заместителя главного редактора, подписанная специалистом, имеющим ученую степень доктора наук и/или ученое звание профессора. Рецензия должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов.

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.

2.3. Рассмотрение материалов

Представленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются на рецензирование. После одобрения материалов, 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.

Публикация материалов аспирантов осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться ДОСРОЧНО.

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**