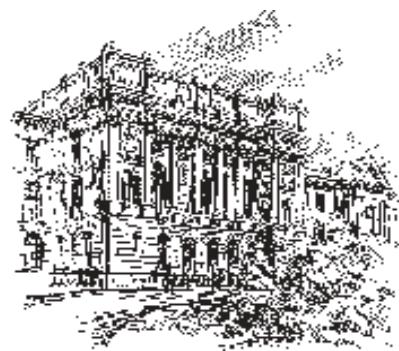


2(123)/2011



Научно-технические ведомости СПбГПУ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического Университета

Министерство образования и науки РФ
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

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

СЕРИЯ «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

*Васильев Ю.С., академик РАН — председатель;
Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор;
Башкаров А.Я., д-р техн. наук, профессор;
Глухов В.В., д-р экон. наук, профессор;
Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;
Рудской А.И., д-р техн. наук, профессор;
Федотов А.В., д-р экон. наук, профессор.*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

*Васильев Ю.С., академик РАН — председатель;
Акопова М.А., д-р пед. наук, профессор;
Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор — зам. председателя;
Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор — зам. председателя;
Иванов А.В., д-р техн. наук;
Ильин В.И., д-р физ.-мат. наук, профессор;
Кузнецов Д.И., д-р филос. наук;
Матенев О.А., технический секретарь;
Снетков В.Н., д-р полит. наук, профессор.*

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

С 2002 года журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Журнал издается в пяти сериях:
Наука и образование;
Физико-математические науки;
Экономические науки;
Информатика, телекоммуникации, управление;
Гуманитарные и общественные науки.

Журнал зарегистрирован в Госкомпечати РФ.
Свидетельство № 013165 от 23.12.94.

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.elibraru.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 серии (812) 294-47-72.

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2011



Содержание

Дегтярева Р.В. Выборы ректора Санкт-Петербургского государственного политехнического университета	9
Федосов Е.А. Авиационная промышленность	21

Энергетика и электротехника

Козлов В.Н., Тросько И.У. Анализ хаотических режимов электроэнергетических систем	35
Андреев К.Д., Забелин Н.А., Рассохин В.А. Выбор паровой турбины для парогазовой установки на базе газотурбинного двигателя типа НК-16СТ	43
Поспелов А.Ю., Георгиева Ю.Г., Жарковский А.А. Верификация результатов расчета течения в отсасывающей трубе гидротурбины ГЭС	53
Зандер М.С., Черников В.А. Исследование аэродинамических характеристик блока «ступень — выходной диффузор» стационарной газовой турбины при различных режимах работы	61
Николаев В.Г. Развитие технологий определения ветроэнергетического потенциала России	68
Ромахова Г.А., Трещев Д.А. Экономия топлива на парогазовых и газотурбинных ТЭЦ	76
Молодкина М.А. Тепловой насос в замкнутой системе воздушного охлаждения турбогенератора....	81
Басс М.С. Технико-экономическая оценка внедрения энергосберегающих проектов (на примере Забайкальского края)	85
Трубунских С.А., Батухтин А.Г. Энергетическая эффективность теплопотребляющих объектов	91
Алешина А.С. Тепловые схемы газогенераторных электростанций, работающих на растительной биомассе	99
Тринченко А.А. Снижение выбросов оксидов азота при ступенчатом сжигании топлива	104
Кудряшева И.Г., Мирошникова Ю.А. О значении гидроаккумулирующих станций в энергосистеме Украины	109
Киселев В.Г. Влияние постоянных буждающих токов на скорость коррозийных процессов	113
Николаев В.Г. Модели технической готовности ветроэлектрических станций	120
Карпушина Т.И. Слюдосодержащая изоляция новых типов обмоточных проводов для высоковольтных электрических машин в процессе теплового старения	129
Пуликов П.Г. Исследование диффузии водорода через фторопластовую пленку	135

Машиностроение

Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Шутеев В.А. Ультраструйная экспресс-диагностика материалов и изделий машиностроения	141
Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю., Герасимов И.М. Об эффективности теплового цикла «адиабатного» поршневого двигателя внутреннего сгорания	147
Семёнов Н.В., Ролле В.Е. Расчет параметров подвески автомобиля с учетом поперечно-угловых колебаний кузова	152
Солодилова Н.А., Челпанов И.Б. Трехмерное отображение элементов схем	156
Мацко О.Н. Исследование характеристик нелинейного пружинного аккумулятора с поступательной парой	162

Будашов И.А. Мощность резания ротационно-дискового измельчителя толстостебельных культур	167
Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терёшин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями	170
Гаприндашвили Н.К., Семёнов А.Г. Новые технологии и оборудование для выращивания биологических объектов в искусственных климатических условиях.....	176

Металлургия и материаловедение

Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Наноструктурирование материалов с использованием эффекта сверхпластичности	181
Барабанщикова Ю.Г., Чулкин С.Г. Анизотропия электрической проводимости керамической массы при трении	184
Рудской А.И., Колбасников Н.Г., Ринггинен Д.А. Получение субмикронной и нанокристаллической структуры металлов методами горячей и теплой деформации	191
Голод В.М., Емельянов К.И. Компьютерный анализ кинетики и полноты перитектического превращения	205
Колбасников Н.Г., Мишин В.В., Шишов И.А., Забродин А.В., Маркушкин Ю.Е. Исследование компактирования высокопористой наноструктурной бериллиевой губки	211
Ганзуленко О.Ю., Кириллов Н.Б., Петкова А.П., Яковицкая М.В. Водородопроницаемость и работоспособность аустенитных сталей и сплавов в водородсодержащих средах	218
Пупышев А.М., Попов И.О. Исследование макрокинетических закономерностей восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов углеродом кокса и жидкими углеводородами	224
Николаев Ю.К., Зеленин Ю.В., Кондратьев С.Ю. Влияние структуры металла шва на характер разрушения сварных соединений аустенитных сталей	229
Акуличев А.Г., Андреева В.Д., Трофимов В.В. Субструктура нитроцементованной стали 20Х3МВФ-Ш после закалки и последующей обработки	237
Мишин В.В., Шишов И.А., Забродин А.В., Маркушкин Ю.Е. Обоснование выбора критерия, описывающего разрушение малопластичных металлов при холодной прокатке	242
Суфияров В.Ш., Голод В.М. Анализ условий изменения морфологии фронта кристаллизации низколегированных сталей	251
Попов И.О., Пупышев А.М. Газогенераторный метод селективного восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов	255
Новиков Н.И., Казаков С.П. Количественная оценка направлений горизонтальной диверсификации металлургического производства	262

Природопользование

Москвин П.А. Биотопливо для автомобилей и проблемы его применения	269
Исабеков Т.А., Лавров Н.П. Алгоритм управления водораспределением на трансграничном Чумышском гидроузле	274
Иголкин Б.И., Васильева Л.К., Васипов В.В., Ребане К.Ю., Мехтиев В.С. Электропроводность растительных масел в зависимости от температуры и частоты электромагнитных колебаний ...	278

Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Кефели И.Ф. Глобальное оружие: предыстория и реальные проблемы современности	283
Бараковских С.А., Арканов П.В. Оценка теплофизических характеристик составной среды огнезащитных конструкций при пожарах на нефтегазовых объектах	291
Гуменюк В.И., Атоян Г.Л., Сыров А.А. Обеспечение защищенности и минимизация затрат при перегрузке ядерного топлива для реакторов типа ВВЭР	294
Розов А.Л., Белянин В.А. Обеспечение пожарной безопасности объектов экономики и социальной сферы в условиях рыночной экономики	303

Иванова Т.Ю. Оценка объемов возможных аварийных разливов нефтепродуктов	309
Акулов А.Ю., Смирнов В.В. Алгоритм проектирования огнезащитного состава для металлических конструкций объектов нефтегазового комплекса	312
Боровиков В.А., Сластенко В.К. Определение эффективности промышленных взрывчатых веществ методом подводного взрыва	316

Моделирование. Математические методы

Космач В.Ф. Квантово-механический анализ абсолютной шкалы геологического летоисчисления Земли	321
Кабалык К.А., Крыллович В. Верификация численной модели течения вязкого газа в ступени центробежного компрессора	329
Смазнов Д.Н. Конечно-элементное моделирование стоек замкнутого сечения из холодногнутых профилей	334
Барабанщикова Ю.Г., Чулкин С.Г. Трение дисперсных смесей на основе портландцемента	337
Лисин С.К., Федотов А.И. Нелинейные модели приближенных вычислений в задачах обработки данных	343
Снежко В.Л. Гидродинамическое давление в напорном туннеле при частичном закрытии затвора ..	347
Бабкин А.В., Нестерова Е.И. Модели и алгоритмы квадратурного оценивания образцов техники	352

Вопросы образования

Васильев Ю.С., Попова В.А. Поддержка молодежи (15 лет фонду ТВН СПбГПУ)	358
Винокурова Е.В., Галиновский А. Л., Пудалова Е.И. Перспективы формирования системы сертификации инженерных кадров на основе требований работодателей	367
Иванов А.В. Цифровая печать в медиапространстве	372

Хроника событий

Василий Романович Окороков (к 75-летию со дня рождения)	377
Барanova О.В. В Петербурге решаются проблемы энергосбережения	380

К 110-летию открытия и начала занятий в СПбГПУ

Скуратов В.И. Первые шаги Попечительского совета	383
Розин В.Ф., Прохоров С.А., Каженцев А.В. Дому ученых в Лесном — 75	386
Соловьев А.И., Соколов В.А. К истории студенческого клуба СПбГПУ	389
Кесаманлы Ф.П. Политехники — трижды Герои Социалистического Труда. Член-корреспондент АН СССР Николай Леонидович Духов	395
Забойин В.Н., Попов В.В. А.И. Вольдек (к столетию со дня рождения)	402
Сведения об авторах, контактные данные	405
Аннотации, ключевые слова	414



Contents

Degtyaryova R.V. Elections of the rector of the St.-Petersburg state polytechnical university	9
Fedosov E.A. The aviation industry	21

Power engineering and electrical engineering

Kozlov V.N., Trosko I.U. The analysis of chaotic modes of electropower systems	35
Andreev K.D., Zabelin N.A., Rassokhin V.A. The selection of the steam turbine for the steam-gas plant on the base of the gas turbine engine HK-16CT	43
Pospelov A.U., Georgieva U.G., Jarkovsky A.A. Verification of results of calculation of a current in a sucking away pipe of the water-wheel of hydroelectric power station	53
Zender M.S., Chernikov V.A. Aerodynamic characteristics of the block «stage — the output diffuser» stationary gas turbine at various operating conditions	61
Nikolaev V.G. Development of technology of Russian wind potential definition	68
Romakhova G.A., Treschev D.A. Fuel savings through the use of cogeneration at combined cycle and gas turbine heat power plants	76
Molodkina M.A. The thermal pump in the closed system of air cooling of a turbogenerator	81
Bass M.S. Techno-economic evaluation of energy saving technologies (for example, the trans-baikal region)	85
Trebunskikh S.A., Batuhtin A.G. Entropic efficiency of heat consuming objects	91
Aleshina A.S. Thermal power circuits operating at the plant biomass	99
Trinchenko A.A. Decrease of nox emissions by staged fuel combustion	104
Kudryasheva I.G., Miroshnikova Ju.A. About significans of pumped storage plants in the power supply system of Ukraine	109
Kiselev V.G. Influence of constant wandering currents on speed of corrosion processes	113
Nikolaev V.G. Models of technical availability of wind turbine	120
Karpushina T.I. Studying the characteristics of contemporary magnet wires' mica insulation during heat aging process	129
Pulikov P.G. Scientific research of the hydrogen diffusion through a fluoroplastic membrane	135

Machine industry

Abashin M. I., Barzov A. A., Galinovsky A. L., Shuteev V.A. Minimization of the technological cost price of hydroabrasive cutting with allowance cost and technological parameters of cutting	141
Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu., Gerasimov I.M. About thermal efficiency of the cycle of the «adiabatic» piston internal combustion engine	147
Semenov N.V., Rolle V.E. Design procedure of the car suspension values allowing for cross-section-angular body oscillations	152
Solodilova N.A., Chelpanov I.B. Three-dimensional display of elements of diagram	156
Matsko O.N. Examination of characteristics of nonlinear spring accumulator with sliding pair	162

Budashov I.A. A leading-out of the formula of the power consumed by the rotational-disk shredder on process of cutting 167

Hrostitsky A.A., Evgrafov A.N., Tereshin V.A. Geometry and kinematics of spatial six-link mechanism with redundant links 170

Gaprindashvili N.K., Semenov A.G. New technologies and equipment for cultivation of biological objects in artificial climates 176

Metallurgy and materials technology

Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N. Nanostructuring materials using superplasticity effect .. 181

Barabanshchikov U.G. Chulkin S.G. Anisotropy of electric conductivity of ceramic mixture during friction 184

Rudskoy A.I., Kolbasnikov N.G., Ringinen D.A. Reception of submicronic and nanocrystalline structure of metals by methods of hot and warm deformation 191

Golod V.M., Emelyanov K.I. The computer analysis of kinetic and fullness of peritectic transformation 205

Kolbasnikov N.G., Mishin V.V., Shishov I.A., Zabrodin A.V. Research of pressing of highly porous nanostructured sponge of a beryllium 211

Ganzulenko O.Y., Kirillov N.B., Petkova A.P., Yakovitsky M.V. Study of the hydrogen permeability and evaluation of performance of austenitic steels and alloys in hydrogen-containing environments 218

Pupyshev A.M., Popov I.O. Research of macrokinetic conformities to law of renewal of difficult oxide iron-titanium concentrates carbon of coke and liquid hydrocarbons 224

Nikolaev Yu.K., Zelenin Yu.V., Kondratyev S.Yu. Influence of the structure of metal seam on the character of failure of austenitic steel welds 229

Akulichev A.G., Andreeva V.D., Trofimov V.V. Microstructure of carbonitrided 20X3MBФ-Ш grade steel after quenching and following treatment 237

Mishin V.V., Shishov I.A., Zabrodin A.V., Markushkin Y.E. Substantiation of criterion option for describing fracture of low-plastic metals under cold rolling 242

Sufiyarov V.Sh., Golod V.M. The analysis of conditions for changing of crystallization front morphology during solidification of low-alloyed steels 251

Popov, N., Pupyshev A.M. The gas-producing method of selective disoxidation of complex oxide iron-titanium concentrates 255

Novikov N.I., Kazakov S.P. Quantitative assessment of directions horizontal diversification metallurgical 262

Natural management

Moskovin P.A. Biofuels for cars and the problem of its application 269

Isabekov T.A., Lavrov N.P. Algorithm of management of water distribution on transboundary hydroknot chumyshsky 274

Igolkin B.I., Vasil'eva L.K., Mekhtiev V.S., Vasipov V.V., Rebane K.Y. Electrical vegetable oil depending on temperature and frequency of electromagnetic oscillations 278

Safety in emergency situations

Kefeli I.F. The global weapon: background and real problems of the present 283

Barakovskih S.A., Arkanov P.V. Evaluation of thermalphysic characteristics of composite structure of fireproof constructions at fires involving oil-and-gas facilities 291

Gumenyuk V.I., Atoyan G.L., Syrov A.A. ensuring protectability and cost minimization of nuclear fuel handling for WMWC reactors 294

Rozov A.L., Belyanin V.A. Ensuring of fire safety of economy and social objects in market economy 303

Ivanova T.Y. Estimation of volumes of possible emergency floods of oil products	309
Akulov A.Y., Smirnov V.V. Algorithm of designing offireproof compound for metal designs of objects of oil-and-gas branch	312
Borovikov V.A., Slastenko V.K. New way of definition of efficiency industrial explosives the method of underwater explosion	316

Modeling. Mathematical methods

Kosmach V.F. The quantum-mechanical method of analysis of the absolute scale of geological chronology of the Earth	321
Kabalyk K.A., Kryllowicz W. Verification of the numerical model of viscous gas flow within the centrifugal compressor stage	329
Smaznov D.N. Modelling of columns of box section from thin walled profiles	334
Barabanshchikov U.G. Chulkin S.G. Dispersed mixture friction on base of portland cement	337
Lisin S.K., Fedotov A.I. Nonlinear model of approximate calculations in problems of analysis of the experience	343
Snezko V.L. Hydrodynamic pressure in pressure tunnel with the partial closing of the shutter	347
Babkin A.V., Nesterova E.I. Models and algorithms for qualimetric assessment models of devices	352

Education matters

Vasiliev Yu. S., Popova V.A. Support for young developers and innovations – TVN fund SPBstu celebrates it's 15 anniversary	358
Vinokurova E.V., Galinovsky A. L., Pudalova E.I. The outlooks creation of a certification system for engineering staff on the basis requirements of the employers	367
Ivanov A.V. The digital press in media space	372

Chronicle of events

<i>Basiliy R. Okorokov (on the 75 anniversary from the date of a birth)</i>	377
Baranova O.V. NTS meeting of the Government of St. Petersburg	380

By the 110th opening and the start of classes in the SPBstu

Skuratov V.I. First Steps Board of Trustees	383
Rozin V.F., Prokhorov S.A., Kazhentsev A.V. House of scientists in the Forest – 75	386
Soloviev A.I., Sokolov V.A. On the history of a student club SPBstu	389
Kesamanly F.P. Polytechnics — three heroes of socialist labor. Corresponding Member ANSSSR Nikolay L. Duhov	395
Zaboin V.N., Popov V.V. A.I. Voldek (on the centenary of his birth)	402
<i>About the authors, contact information</i>	405
<i>Abstracts, key words</i>	414



ВЫБОРЫ РЕКТОРА САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Конференция научно-педагогических и других категорий работников, а также обучающихся СПбГПУ состоялась 18 апреля 2011 года. Открыл конференцию председатель комиссии по выборам ректора СПбГПУ — директор Центра прогнозирования научно-технического развития профессор Альберт Яковлевич Башкаров. В президиум конференции избраны широко известные ученые: Жорес Иванович Алфёров — академик РАН, лауреат Нобелевской премии; Юрий Сергеевич Васильев — академик РАН президент СПбГПУ. Председатель конференции — член-корреспондент РАН ректор Политехнического университета Михаил Петрович Федоров.

Председатель комиссии по выборам ректора **Альберт Яковлевич Башкаров** проинформировал делегатов конференции о результатах работы комиссии. Он сообщил, что комиссия:

организовала широкое информационное обеспечение выборов ректора путем размещения объявлений о выборах на сайте университета, в газете «Политехник», на досках объявлений, размещенных на территории университета;

координировала проведение собраний трудовых коллективов структурных подразделений по избранию делегатов на конференцию. Всего было избрано 225 делегатов;

регистрировала и рассматривала документы, поступившие от кандидатов на должность рек-



тора, от Ученого совета, ученых советов факультетов (институтов) университета;

информировала работников и обучающихся о дате выборов ректора, о кандидатах на должность ректора, о графиках встреч с кандидатами;

до проведения конференции обеспечивала любому желающему работнику и обучающемуся возможность ознакомиться с программой каждого кандидата на должность ректора;

осуществляла контроль за соблюдением нормативных правовых актов, Устава университета и Положения о процедуре проведения выборов ректора.

Всего было выдвинуто три кандидата на должность ректора: В.В. Кобзев, В.С. Зaborовский, А.И. Рудской; кроме того, прошел процедуру самовыдвижения Н.И. Ватин. Попечительский совет СПбГПУ поддержал выдвижение учеными советами факультетов чл.-корр. РАН проректора по научной работе СПбГПУ А.И. Рудского.

Право выдвижения на должность ректора по положению о процедуре избрания ректора предоставлено ученым советам факультетов и Ученому совету университета. Этим правом воспользовались ученые советы 19 факультетов.

В результате учеными советами факультетов и институтов были выдвинуты:

Рудской Андрей Иванович — 1957 года рождения, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, проректор по научной работе, заведующий кафедрой пластической обработки металлов. Он выдвинут учеными советами 13-ти факультетов и поддержан учеными советами 4-х факультетов.

Зaborовский Владимир Сергеевич — 1956 года рождения, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телематики факультета при ЦНИИ робототехники и кибернетики, заместитель главного конструктора ЦНИИ РТК (по совместительству). Он выдвинут ученым советом факультета при ЦНИИ РТК и поддержан решением Ученого совета факультета комплексной безопасности.

Кобзев Владимир Васильевич — 1961 года рождения, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики и менеджмента в машиностроении; выдвинут ученым советом факультета экономики и менеджмента.

Решением Ученого совета СПбГПУ от 21 февраля 2011 года Ватин Николай Иванович, который прошел процедуру самовыдвижения,

включен в список кандидатов на должность ректора Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

15 марта 2011 года Н.И. Ватин снял свою кандидатуру.

17 марта 2011 года три кандидатуры на должность ректора Политехнического университета — Кобзева Владимира Васильевича, Зaborовского Владимира Сергеевича и Рудского Андрея Ивановича — проходили процедуру согласования в Аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации.

С учетом решения Аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ, а также личного заявления Владимира Васильевича Кобзева о снятии своей кандидатуры к участию в выборах ректора допущены два кандидата: Зaborовский Владимир Сергеевич и Рудской Андрей Иванович.

Всем делегатам были разданы программы кандидатов на должность ректора. Конференция приняла к сведению информацию председателя комиссии по выбору ректора и констатировала, что комиссия выполнила все задачи, предусмотренные планом мероприятий по подготовке и проведению выборов ректора.

Центральным моментом в работе конференции, конечно, было выступление и обсуждение программ кандидатов на должность ректора — Владимира Сергеевича Зaborовского и Андрея Ивановича Рудского.

Владимир Сергеевич Зaborовский, выступая, остановился на главных моментах своей программы. Он, в частности, сказал, что основные положения программы определяют пути развития Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбГПУ) на 2011–2015 годы. В ней учтены актуальные аспекты реформирования отечественной системы образования, которые отражают приоритеты экономического развития страны и связаны с созданием инновационной инфраструктуры модернизации промышленности и использованием информационных технологий (ИТ-технологий) для повышения качества образования и роста профессиональной компетентности специалистов. Существующая в СПбГПУ система подготовки кадров отличается фундаментальностью, междисциплинарным характером и глубиной получаемых знаний. Однако в условиях, когда ключевым фактором промышленного роста становится глобализация,



а локомотивом экономического развития — ИТ-технологии, сложившаяся система образования нуждается в модернизации. Приоритетом модернизации должна стать интеграция процессов обучения с проведением научных исследований и инженерных разработок при использовании современных технологий обработки информации, баз знаний, систем компьютерного моделирования и средств автоматизации проектирования. Название программы В.С. Зaborовского — «Интеграция образовательной и научной деятельности на основе ИТ-технологий». Ее целями являются повышение качества подготовки студентов на основе модернизации лабораторно-исследовательской базы, формирование организационно-информационной инфраструктуры интеграции процессов обучения и проведение научных исследований с использованием современных ИТ-технологий.

Пути реализации этой программы. Предпосылкой для разработки предложенной программы стал успешный опыт реализации в 2006–2008 гг. проекта «Развитие политехнической системы подготовки кадров в инновационной сфере науки и высокотехнологичных производств Северо-Западного региона России», а также победа СПбГПУ в 2010 году во Всероссийском конкур-

се на звание «Национальный исследовательский университет» (НИУ). Достигнутые результаты показывают, что коллектив СПбГПУ обладает знаниями, технологиями и опытом для выполнения комплексных научных исследований по широкому спектру приоритетных направлений науки и техники. Однако перспективы развития СПбГПУ как НИУ зависят от масштабности, научной обоснованности приоритетных направлений развития, компетентности исполнителей и социальной ответственности руководства. В этих условиях ориентация подготовки специалистов на проведение междисциплинарных исследований, выполняемых с использованием ИТ-технологий, открывает перед СПбГПУ новые возможности: интеграцию научной и образовательной деятельности на основе внедрения систем проектирования, ориентированных на применение суперкомпьютеров, современных средств автоматизации инженерной деятельности и технологий цифрового производства (CAD/CAE/CAM систем).

Развитие материально-технической базы. Первым шагом в модернизации материально-технической базы, обеспечивающей интеграцию учебного и научного процессов, должно стать создание распределенной системы параллельно-

го проектирования, моделирования и проведения инженерных расчетов. В основу построения такой системы следует заложить средства сетевого объединения корпоративных вычислительных ресурсов, обеспечивающие создание информационного портала программных систем, работающих в режиме удаленного доступа.

Применение технологии «программное обеспечение как сервис» расширяет возможности использования корпоративных информационно-вычислительных ресурсов за счет суперкомпьютерных технологий и формирования корпоративной сетевой инфраструктуры, ориентированной на использование CAD/CAE систем. Развитие в СПбГПУ такой инфраструктуры позволит улучшить взаимодействие физических и инженерных факультетов в рамках выполнения приоритетных междисциплинарных научно-технических исследований, при создании высокотехнологических систем нового поколения, ускорит внедрение результатов фундаментальных исследований в области физики, наноэлектроники, энергетики, экологии и информатики. Привлечение к выполнению научных исследований студентов и молодых сотрудников вуза расширит рамки их профессиональной компетентности, повысит качество проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, результаты которых должны отвечать требованиям отраслевых международных и государственных стандартов. Финансовой базой для проводимой модернизации, наряду с государственными целевыми программами, должны стать проекты, реализуемые по заказам отечественной промышленности и в рамках международной кооперации.

Повышение квалификации. Важным результатом модернизации наряду с техническим обновлением учебно-лабораторной базы должно стать повышение профессиональной компетентности сотрудников вуза и информационной открытости СПбГПУ как НИУ, осуществляющего свою научно-образовательную деятельность в рамках тесного сотрудничества с ведущими отечественными компаниями и корпорациями. Модернизация в интересах интеграции образовательного и научного процессов требует широкого привлечения студентов и молодых специалистов, обладающих высокой мотивацией при использовании современных ИТ-технологий для своего профессионального и карьерного роста. Поэтому особое внимание необходимо уделить орга-

низации эффективной системы повышения квалификации и переподготовки преподавателей и сотрудников вуза в рамках целевых программ, ориентированных на решение задач управления, проведение инженерных расчетов и автоматизацию проектирования на базе современных CAD/CAE приложений.

В системе повышения квалификации сотрудников большую роль должна сыграть организация целевых стажировок и международных обменов в рамках учебной и научной деятельности. Для активного привлечения к этому процессу студентов и молодых сотрудников в СПбГПУ необходимо создать специальный фонд целевой поддержки научно-исследовательской деятельности студентов и финансирования их участия в международных конференциях. Деятельность такого фонда будет способствовать решению приоритетной задачи привлечения талантливой молодежи в ряды преподавателей и научных сотрудников СПбГПУ, повысит эффективность работы аспирантуры, в том числе за счет расширения спектра международных проектов, реализуемых в рамках проведения совместных научно-технических разработок и фундаментальных исследований.

Социальная направленность. При реализации Программы развития СПбГПУ необходимо учитывать не только технологические аспекты интеграции образовательного и научного процессов, но и социальную направленность проводимых преобразований. Это прежде всего относится к проведению мероприятий по повышению привлекательности СПбГПУ как ведущего высшего учебного заведения России.

В условиях уменьшения числа выпускников российских школ и перехода к приему на основе результатов ЕГЭ следует ожидать обострения конкуренции вузов страны в привлечении лучших абитуриентов. Поэтому требуется принять неотложные меры, которые позволят не только сохранить контингент учащихся, но и увеличить прием в СПбГПУ за счет иногородних и иностранных граждан. Среди таких мер необходимо выделить прежде всего: развитие студенческих общежитий, совершенствование системы дистанционного обучения, использование новых форм вовлечения студентов в сферу инновационной деятельности и предпринимательства, в том числе на базе малых инновационных предприятий (МИП). Организация МИП станет



важным стимулом для притока в вуз творчески активной молодежи, что позволит увеличить набор студентов и предложить новые подходы к целевой подготовке кадров на основе решения конкретных научных и инженерных задач.

Важным фактором успешного выполнения программы является совершенствование учебного процесса в рамках межрегиональных и международных форм сотрудничества. Рост числа специалистов и ученых, проходящих переподготовку в СПбГПУ, а также количество внедренных в производство студенческих разработок станут важными критериями успешного развития политехнической научной школы, объективными индикаторами эффективности взаимодействия вуза с ведущими предприятиями отечественной промышленности и международными корпорациями. В свою очередь, это потребует интенсификации научных обменов путем привлечения к выполнению целевых проектов, выполняемых под руководством ведущих ученых СПбГПУ, студентов, молодых специалистов и преподавателей, повышения их зарплаты и социальной защищенности. Для этого необходимо:

разработать эффективный механизм поддержки молодежи, достигшей результатов в науке и инженерной деятельности;

разивать систему стажировок и производственных практик на базе ведущих предприятий, институтов РАН и международных корпораций;

расширить возможности студентов по реализации инициативных проектов в сфере науки, техники и студенческого самоуправления.

Успешное выполнение программы позволит СПбГПУ сохранить статус ведущего научно-образовательного учреждения страны, активно участвующего в процессах модернизации экономики и формировании в России информационного общества.

Затем выступил кандидат на должность ректора университета **Андрей Иванович Рудской**. Обращаясь к делегатам конференции, Андрей Иванович подчеркнул, что сегодня в нашей стране назрела острая необходимость формирования новой экономики — экономики знаний, лидерства и инноваций на основе интеграции образования, науки и промышленности. Результатом этой интеграции должна стать новая востребованная мировым рынком конкурентоспособная продукция, которая позволит нашей стране занять достойное место в мировой экономической системе. Высшая школа играет здесь ключевую роль, являясь поставщиком компетентных кадров, источником новых технологий и инновационных разработок.



Сегодня Политехнический университет — один из ведущих российских вузов. В 2010 году, благодаря усилиям всего многотысячного коллектива политехников, мы вошли не только в число 39-ти ведущих российских университетов, но и в число 9-ти вузов-победителей всех мегаконкурсов минобрнауки.

Сегодня перед нами стоят новые комплексные задачи. Успешно решить их можно, только опираясь на богатый научно-образовательный опыт Политехнического, мощный интеллектуальный потенциал коллектива и профессиональную организацию всех видов деятельности в вузе.

Основная цель предлагаемой А.И. Рудским программы — модернизация и развитие инновационного исследовательского политехнического университета нового типа, где будут интегрированы передовые образовательные технологии, междисциплинарные научные исследования и научноемкие технологии мирового уровня.

Определяющими принципами развития станут:

обеспечение преемственности поколений и традиций Политехнического, сохранение, создание новых и дальнейшее развитие ведущих научно-педагогических школ;

закрепление позиций СПбГПУ как одного из ведущих университетов в системе высшего профессионального образования России;

устойчивое материально-техническое и социально-экономическое развитие университета, обеспечивающее привлекательные и благоприятные условия для эффективной и качественной деятельности его коллектива.

Модернизация и развитие университета будут основаны на успешном выполнении Программы развития СПбГПУ как национального исследовательского университета на 2010–2019 годы, а также реализации других образовательных, научных и инновационных программ и проектов. Обязательное условие — постоянный мониторинг динамичного изменения внешних условий в стране и мире (в сфере образования, науки и промышленности, в области новых технологий и инноваций) и соответствующая корректировка стратегии развития университета.

Говоря об основных задачах университета в образовательной деятельности, необходимо учитывать демографическую ситуацию, которая является серьезным испытанием для высшей

школы. За последние 10 лет численность школьников сократилась примерно на 40 %. Это оказывает влияние на контингент обучающихся. В ближайшие годы последствия демографического спада будут по-прежнему заметны. Численность студентов в 2013 году в стране может составить всего около четырех миллионов человек, снизившись более чем на 40 % по отношению к численности студентов в 2009 году (более семи миллионов человек). Уменьшение числа выпускников школ приведет к обострению конкурентной борьбы между вузами за наиболее подготовленных и талантливых абитуриентов. В связи с этим одна из основных задач университета — развитие системы отбора лучших абитуриентов. При этом ставку нужно делать не только на победителей Всероссийских олимпиад. Хотя в 2010 году по результатам ЕГЭ у первокурсников наш университет и вошел в число наиболее популярных государственных вузов России, необходимо приложить все усилия для привлечения абитуриентов с максимально высокими баллами ЕГЭ. Это важнейшее условие для подготовки конкурентоспособных кадров нового поколения, востребованных национальной экономикой.

Одной из необходимых мер (об этом сейчас много говорят) является повышение престижа инженерной деятельности в глазах абитуриентов. Важно создать для молодежи как привлекательные условия обучения на инженерных направлениях, так и выгодные перспективы трудоустройства по профессии. Для этого в конце марта Президент РФ поручил Правительству подготовить предложения по повышению нормативов финансирования подготовки студентов инженерных специальностей. Сегодня в технических вузах в среднем по России на одного студента в год тратится 80 тысяч рублей. Увеличение норматива на инженеров по сравнению с нормативом для гуманитариев и экономистов в полтора-два раза — хороший стимул к обновлению для технических вузов и, конечно же, для нашего Национального исследовательского политехнического университета. Тем более что в условиях предстоящего перехода на нормативное подушевое финансирование, когда «деньги следуют за студентом», совершенствование форм и технологий организации учебного процесса — для нас одна из приоритетных задач.

Вторая основная задача в сфере образования — усиление интеграции образовательного



процесса с научными исследованиями, передовыми технологиями и разработками для реального сектора экономики. Если раньше мы говорили об «образовании через науку», то теперь необходимо говорить об «образовании через науку и технологии». Одна из наших основных задач — опережающая целевая подготовка востребованных промышленностью кадров. К сожалению, для современного российского образования характерна несогласованность номенклатуры предоставляемых образовательных услуг с требованиями к их качеству и содержанию со стороны рынка труда. Поэтому важное значение приобретает работа по формированию и совершенствованию спектра образовательных программ всех уровней, отвечающих возрастающим потребностям высокотехнологичных отраслей промышленности. Ключевым звеном в организации этой деятельности должны быть деканы факультетов, заведующие кафедрами, руководители научно-педагогических школ и ведущие ученые университета. Мы должны обеспечить конкурентоспособность и востребованность наших выпускников в условиях перехода к двухуровневой системе подготовки. Необходимо создать гибкую, адаптированную к потребностям национальной экономики систему формирования бакалаврских и магистерских программ. Новые кадры должны быть ориентированы на работу с передовыми технологиями, с технологиями завтрашнего дня. Очевидно, что их подготовка не может осуществляться без активной научно-инновационной деятельности самих преподавателей, привлекающих студентов к таким работам.

Сила нашего университета — в его политехничности. В стенах вуза работают около 2,5 тысяч специалистов в различных научных областях, 147 кафедр обеспечивают учебный процесс. Новые знания возникают, как правило, на стыке многих дисциплин. Поэтому А.И. Рудской считает необходимым развивать и укреплять междисциплинарные составляющие физико-математических, естественнонаучных, инженерно-технических, гуманитарных и экономических дисциплин, а в научной деятельности — переходить от узкоспециализированных исследований и отраслевых технологий к междисциплинарным исследованиям и надотраслевым научноемким технологиям, которые эффективно применяют высокотехнологичные промышленные компании.

Полидисциплинарность имеет и свою специфику. Например, необходимо изучить, проанализировать и решить проблему дублирования направлений и специальностей, разработать учебные программы с различным уровнем преподавания общих предметов на разных факультетах.

Одна из наших важнейших задач — создание притягательной интеллектуальной среды и передовой инфраструктуры с целью привлечения наших лучших выпускников к работе в университете. В условиях прогнозируемого снижения численности ППС на 20–30 % это позволит нам, во-первых, повысить динамику кадрового обновления и решить одну из важнейших проблем — омоложение персонала, во-вторых, сохранить преемственность поколений и укрепить наши ведущие научные школы лучшими кадрами, а в результате увеличить к 2016 году долю научно-педагогических работников и инженерно-технического персонала в возрасте от 30 до 49 лет до 38 %.

Научно-исследовательская работа в университете также нуждается в существенной модернизации в силу новых задач, которые ставит перед нами экономика страны.

Важнейшие задачи в научной деятельности — увеличение объемов НИОКР, сохранение и расширение спектра инициативных фундаментальных исследований и прикладных исследований по заказам предприятий, продвижение университета на международном рынке научноемких технологий и разработок. Отмечу, что работа в этом направлении ведется интенсивно и достаточно успешно: за последние 5 лет ежегодные объемы научно-инновационной деятельности университета выросли более чем в пять раз и в настоящее время приближаются к миллиарду рублей. Более того, в 2007–2008 годах в рамках реализации инновационной программы в нашем вузе получили развитие новые направления научных исследований, ставшие приоритетными: это исследования в области энергетики, ресурсосберегающих и экологических технологий, технологий создания новых материалов, нанотехнологий, включая нанобиотехнологии, мультидисциплинарных компьютерных технологий, машиностроительных и информационных технологий. Все они являются междисциплинарными и находятся в русле государственных приоритетов развития науки и технологий. Нужно

продолжить увеличение доли междисциплинарных прикладных исследований для решения комплексных задач высокотехнологичной промышленности. Мы должны сориентировать научную деятельность университета на разработку и развитие технологий, востребованных реальным сектором экономики, стимулировать кооперацию вуза с промышленностью. Результатом этой работы должна стать ориентация научных исследований и разработок на создание инновационных продуктов и услуг и внедрение их в производство. Один из основных показателей эффективности новых форм организации НИР — увеличение в ближайшие 3–4 года доли доходов в бюджете университета от научно-инновационной деятельности до 20 %.

Для этого необходимо принимать активное участие в выполнении программ инновационного развития государственных и частных корпораций и компаний, а также в деятельности национальных технологических платформ, нужно организовать эффективное взаимодействие с Фондом развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий (фондом «Сколково»).

Наш университет победил во всех мегаконкурсах Минобрнауки России. В настоящее время в вузе реализуются программы становления национального исследовательского университета, развития инновационной инфраструктуры вуза, кооперации с высокотехнологичными промышленными предприятиями, проведения исследований под руководством ведущих ученых. Результатом выполнения этих программ должна стать современная единая инновационная инфраструктура для проведения научных исследований и развития технологий мирового уровня.

Основной элемент этой инфраструктуры — созданный в конце 2010 года **Объединенный научно-технологический институт (ОНТИ)**. Сейчас формируется структура института. Она уже включает в себя пять НИИ, а в ближайшем будущем в ОНТИ будут созданы технопарк «Политехнический» и бизнес-инкубатор для малых инновационных предприятий. В ближайшие несколько лет завершится оснащение ОНТИ уникальным экспериментальным и испытательным оборудованием, высокопроизводительными вычислительными системами, лицензиями на компьютерные и производственные технологии.

В течение 2011–2013 годов для размещения института будет завершено строительство Научно-исследовательского корпуса общей площадью 25 тыс. кв.м. В результате ОНТИ объединит передовые интеллектуальные и материальные ресурсы университета для решения комплексных научно-технических задач, о которых было сказано. В ОНТИ будет проводиться полный комплекс работ и научноемких услуг: от идеи до создания конструкторско-технологической документации, опытного образца или мелкосерийной продукции. Полидисциплинарность нашего университета как нельзя лучше этому способствует — создание ОНТИ предполагает межкафедральное и межфакультетское взаимодействие ученых Политехнического по самому широкому спектру направлений. На базе ОНТИ планируется и разработка системы внутриуниверситетских «start-up» — создание лабораторий по инициативе молодых ученых университета. Есть уверенность, что институт станет привлекательным работодателем для выпускников и молодых ученых нашего университета, и это тоже будет способствовать решению упомянутой ранее кадровой проблемы.

В ОНТИ будет создан технопарк «Политехнический», включающий в себя бизнес-инкубатор для поддержки молодых предпринимателей-политехников. В рамках технопарка будет развиваться пояс малых инновационных предприятий, тесно связанных и эффективно взаимодействующих со структурными подразделениями университета. Особое внимание будет уделено динамично развивающимся подразделениям университета и конкурентоспособности малых фирм, созданных при нашем вузе. Этотоже будет способствовать привлечению молодых кадров в политехническую среду.

Для концентрации в нашем университете наиболее квалифицированных научных кадров необходимо развивать систему мониторинга и стимулирования результатов научно-инновационной деятельности, в первую очередь — публикаций в реферируемых журналах, защит диссертаций и финансируемых промышленностью НИОКР. Необходимо, чтобы вопросам публикаций в престижных журналах, повышению индексов цитирования наших сотрудников, вопросам защиты результатов интеллектуальной деятельности уделялось повышенное внимание. Только



в этом случае будет расти конкурентоспособность нашего университета, его рейтинг в научно-образовательном пространстве России и мира.

Например, сегодня мы занимаем 8-е место среди российских вузов по индексу цитирования статей, опубликованных научно-педагогическими работниками в реферируемых журналах. Это вполне серьезный показатель. Однако это обеспечивает меньшая часть нашего профессорско-преподавательского состава. Так, «в среднем» на трех наших преподавателей приходится лишь одна публикация в год в реферируемом журнале. Поэтому для сохранения лидирующих позиций университета в области научно-публикационной деятельности необходимо к 2016 году в 3 раза увеличить ежегодное количество статей в реферируемых журналах — сделать нормой для каждого научно-педагогического работника одну публикацию в реферируемом журнале в год. С этой целью будет разработана система поддержки ученых, публикующих статьи в журналах с высоким импакт-фактором.

Известной проблемной зоной всей высшей школы является **аспирантура**. Необходимо повысить эффективность работы аспирантуры и докторантуры по приоритетным направлениям развития университета до 30 % к 2016 году. Нужно разработать и внедрить в практику меры по материальной поддержке научных руководителей аспирантов и научных консультантов докторантов, защищивших диссертации в срок, развивать систему оценки эффективности и стимулирования научной работы самих аспирантов и докторантов.

Одна из основных задач **международной деятельности** университета — усиление роли университета в различных регионах мира как ведущего научно-образовательного центра. Для решения этой задачи необходимо: расширять партнерские связи с ведущими зарубежными образовательными и научными организациями; создавать и внедрять в учебный процесс инновационные международные образовательные программы, конкурентоспособные на мировом уровне; увеличить долю иностранных студентов, обучающихся в университете, до 8 % от общего числа обучающихся и долю финансовых средств, получаемых от этого в структуре доходов университета, до 10 % от объема государственного финансирования. Необходимо развивать работу по формированию системы совместных науч-

но-образовательных центров с участием ведущих зарубежных компаний и высокотехнологичных фирм.

Одна из важнейших проблем современного образования — эффективное применение **информационных и телекоммуникационных технологий**. К сожалению, их использование часто носит эпизодический характер. В нашем вузе целостная электронная среда как фактор повышения качества образования и эффективности научных исследований находится еще в стадии создания. Необходимо интенсифицировать работу по включению в информационное пространство всех сфер деятельности университета — от учебно-научной до финансово-экономической и хозяйственной. В ближайшее время в единую информационную систему нужно интегрировать системы факультетов и кафедр, приемной комиссии, научной части, бухгалтерии, отдела кадров, библиотеки, издательства и др. Необходимо повсеместно перейти к системе электронного документооборота, проходящей сейчас апробацию в учебном отделе университета.

Все меры по развитию системы образования, научных исследований и созданию инновационной инфраструктуры университета не будут иметь никакого результата без заинтересованности в эффективной научно-образовательной работе сотрудников университета. Поэтому одна из первоочередных задач — обеспечение условий для увеличения доходов сотрудников за счет увеличения объемов и расширения спектра платных образовательных услуг, научно-исследовательских и научно-инновационных работ, экспорта науческих и высокотехнологичных услуг. Необходимо усилить обратную связь между собственными усилиями научно-педагогических работников и финансовыми результатами их деятельности, усилить заинтересованность подразделений университета в динамичном развитии на основе собственных кадровых и интеллектуальных ресурсов.

Модернизация университета невозможна без **модернизации системы управления вузом**. Одна из наших важнейших задач — повысить эффективность управления научно-образовательной деятельностью университета. Необходимо повысить качество обслуживания научно-педагогических работников административно-хозяйственными службами университета и преодолеть

такие проявления бюрократизма административно-хозяйственных структур, как пассивность, формализм, излишнее бумаготворчество. Исключить дублирование функций административных подразделений, преодолеть их структурную раздробленность.

Ведущий университет не может стать конкурентоспособным без современных учебных корпусов, лабораторий, библиотек, комфортных жилых городков для студентов и преподавателей. В этой сфере будут продолжены работы по строительству и реконструкции общежитий. В 2011-м году планируется завершить строительство общежития на 240 мест по адресу Лесной пр., 67, в ближайшее время — завершить реконструкцию общежития по адресу Лесной пр., 65. Будет разработан план реконструкции общежитий у станции метро «Лесная» и в массиве по ул. Хлопина. Объекты социальной сферы — жилье, базы отдыха, профилакторий, клуб, спортивные сооружения — определяют качество жизни сотрудников и студентов, а следовательно, привлекательность работы и учебы в нашем университете. Они будут иметь приоритет при реконструкции и новом строительстве. В 2011-м году будет завершен ремонт игровых залов спортивного комплекса университета. Также планируется строительство спортивной площадки для массовых видов спорта, ввод в эксплуатацию бассейна университета. Будет завершена реконструкция санатория-профилактория. Продолжится работа по улучшению условий отдыха сотрудников и студентов на базах отдыха в поселках «Ново-михайловский» и «Горы».

Важнейшая наша задача — сохранить облик университета как объекта культурно-исторического достояния Российской Федерации. Будет продолжена реставрация исторических зданий и сооружений университета. Завершена реконструкция учебно-исторического заповедника «Усадьба князя А. Г. Гагарина» в деревне Холомки Псковской области; усадьба будет использоваться как оздоровительная база и центр конгрессной деятельности университета.

Среди наших основных задач — развитие существующей в университете системы социальной поддержки ветеранов-политехников.

Неотъемлемой частью деятельности университета является внеучебная работа со студентами. Следует развивать и поддерживать деятель-

ность организаций студенческого самоуправления — профсоюзного комитета студентов, студенческого клуба и строительных отрядов. Необходимо формировать систему гражданско-патриотического воспитания студентов, приобщения их к ценностям отечественной и мировой культуры. Для этого в нашем университете есть Центр культурных программ, Дом ученых, студенческий клуб «На Лесном», Историко-технический музей, наконец, гуманитарный факультет. В целом нужно создать для студентов такую среду, чтобы им было интересно учиться и само совершенствоваться.

Андрей Иванович закончил свое выступление словами: «Я уверен, реализация наших планов будет достойна великих достижений многих поколений политехников и упрочит позиции нашего Политехнического как ведущего политехнического университета России! А я постараюсь приложить все усилия для достижения намеченных целей!».

Далее происходило обсуждение программ, предложенных кандидатами на пост ректора.

Профессор **Леонид Борисович Аксенов** сказал: « Политехники всегда серьезно подходили к выбору руководства, и кого выбирали — за того не стыдно. И сегодня наш вуз входит в десятку передовых вузов благодаря стараниям коллектива, благодаря М.П. Федорову, который нас возглавляет уже несколько лет. Конечно, очень большая ответственность в этом плане.

Я внимательно прочитал программы обоих кандидатов (и профессора В.С. Зaborовского, и профессора А.И. Рудского). Они мне понравились. Написаны очень серьезно людьми, которые понимают проблемы нашего вуза, видят пути их решения. Они много оригинального содержат.

Я считаю, что то положение, которое сейчас наш вуз занимает, и те изменения, которые происходят в высшей школе, во многом быстрые и непонятные, требуют такого кандидата, такого ректора, который был бы в эпицентре всех этих событий.

И таким кандидатом, на мой взгляд, является профессор А.И. Рудской. Всем известно, что по его инициативе реализуется целый ряд новых программ в нашем университете, в частности строительство НИИ. Объем выполняемых научных работ за последние годы вырос в 5 раз. Это, несомненно, заслуга А.И. Рудского.



Я его знаю много лет, мы работаем в смежных направлениях. Я помню, как молодого ученого Рудского послали за рубеж на стажировку, и он стал профессором. Вернулся в Россию и основал научный институт, потом стал проректором, членом-корреспондентом РАН. Карьерная производная весьма значима. Я уверен, что с профессором Рудским мы будем не только свидетелями, но и участниками достижений нашего вуза.

Вместе с тем, хотел бы высказать и пожелание моей жены — профессора О.А. Аксеновой. Речь идет о культурном уровне наших студентов. Казалось бы, все есть, но выйдешь на Политехнической станции метро — молодые ребята, наши политехники, красивые, умные, хорошо одетые, а услышишь... Лучше этого не слышать. Об этом, конечно, должна идти речь. Обратите внимание: мимо этих студентов ходят наши преподаватели; часто делают вид, что не замечают. Проходят горожане, которые все замечают: может быть, они не видят специальной подготовки наших студентов, но их культурная подготовка бросается в глаза. Еще великий Монтень в XVI веке в своей книге «Опыты» писал: «Не познавшим науку о культуре, всякая другая наука только во вред».

Я помню пример, когда ректор В.С. Смирнов исключил студента, который толкнул его на выходе из первого корпуса. Это имело большое воспитательное значение как для студентов, так и для преподавателей.

Я уверен, что опытный руководитель профессор А.И. Рудской сумеет и технические проблемы решить, и экономические задачи, и задачи подготовки высококвалифицированных специалистов, и как высококультурный человек будет способствовать повышению культурного уровня нашего университета — лучшего технического вуза нашего города, который является культурной столицей нашей страны.»

Затем выступил профессор **Глеб Андреевич Туричин**, который в своей речи отметил, что кандидат А.И. Рудской — «это очень хороший выбор для Политехнического университета. Андрей Иванович совершенно замечательно умеет подбирать и расставлять кадры. Его избрание покажет вам, что не только будут соблюдены все традиции Политехнического университета (это еще один большой плюс), потому что Андрей Иванович из действующей команды. Все хорошее, на-

работанное этой командой, будет продолжено. Хочу сказать, что этот человек каким был, таким и останется в своей дальнейшей деятельности. Считаю, что это тоже будет большим плюсом».

С особым вниманием делегаты слушали академика **Жореса Ивановича Алфёрова**.

«Я испытываю некоторую неловкость, — сказал он в начале своего выступления, — потому что третий подряд буду выступать за кандидатуру А.И. Рудского. Хотел бы сказать следующее: были представлены неплохие программы, и профессор В.С. Зaborовский представил хорошую программу. Я думаю, что аргументированная необходимость развития информационных технологий в образовании имеет достаточно большие основания. Да, это очень хорошая техническая основа; ее нужно, безусловно, развивать как можно больше. Но не нужно ее делать единственной и основной в системе образования. Нужно сказать, что сегодня перед нашим Политехническим институтом (я, все-таки, работаю в этом заведении непосредственно уже 23 года, а связан с ним 58 лет) стоят на самом деле огромные задачи, задачи страны. Потому что у нас нет более важной задачи в стране, задачи жизни и смерти России, чем возрождение промышленных и высоких технологий. Мы их потеряли за эти 25 лет. И Политехнический институт вместе с другими вузами должен активно работать по воссозданию промышленности, по воссозданию экономики. Только таким способом мы возродим востребованность в наших специалистах. Будем совершенно четко отдавать себе отчет в этом отношении.

Сегодня в сфере высшего образования невозможно предложить одну какую-то идею, за которую можно зацепиться, и все будет хорошо. Сегодня идут процессы реформирования, и иногда ими слишком увлекаются. Нужно это четко понимать. В программе Андрея Ивановича сказано о междисциплинарности. Это очень важно. Информационные технологии тоже очень важны.

Я вчера имел удовольствие присутствовать на вручении европейских театральных премий, и мой старый хороший знакомый Ю.П. Любимов сказал: «Всегда говорили, что театр умрет, поскольку появились телевидение, кино, но театр не умер». Точно также и с информационными технологиями, с новыми методами образования, с ЕГЭ и т. д. никогда не умрет непосредственный контакт.

Театр не умер, потому что в театре мы имеем контакт с артистами, эффект непосредственного присутствия. И в высшем образовании нужно развивать все технологии, самые современные. Но никогда не умрет контакт профессора со студентами, научного руководителя и аспиранта. Это было, есть и будет настоящей основой образования.

Я думаю, что программа Андрея Ивановича отличается и в этом отношении ставит целый ряд необходимых условий для развития. Да, сегодня мы стали национальным исследовательским университетом. Я очень рад, что мы вместе выиграли это высокое звание.

Сегодня очень важно широкое сотрудничество, потому что, чего греха таить, мы за эти 25 лет отстали во многих вещах. Но при этом нам нужно хранить и развивать традиции, которые особенно в нашем Политехническом институте накоплены многими десятилетиями.

Я считаю, что нужно выбрать Андрея Ивановича, который получил большой опыт, работая в должности проректора. Мы имеем очень хороших предшественников: Ю.С. Васильева и М.П. Федорова. Очень важно, что Андрей Иванович работает в Российской академии наук, с Санкт-Петербургским научным центром, с нашим отделением наноинформационных технологий и с нашим Академическим университетом. Я думаю, что Политехнический университет никогда не будет противопоставлять вузовскую и академическую науку. Академическая наука только помогает развивать наше высшее образование, а вузы помогают развивать систему образования в Академии наук, и делаем мы это все вместе.

Думаю и надеюсь, что выберут сегодня Андрея Ивановича. Конечно, ему предстоит очень нелегкая жизнь, но эта нелегкая жизнь — во имя очень высоких целей: сегодня инженерно-техническое образование, конечно, нуждается в реформировании и модернизации и вместе с тем является основой прогресса нашей страны».

Профессор Евгений Иванович Юрьевич начал свое выступление с того, что факультет при ЦНИИ РТК выдвинул кандидатуру В.С. Заборовского:

«В.С. Заборовский — потомственный политехник. Мы его знаем, во-первых, как действующего, очень энергичного ученого. Во-вторых, он прекрасный преподаватель. И, наконец, это прекрасный талантливый организатор.

Что касается его как ученого, я приведу один пример. Недавно он вернулся из Германии, где проводил переговоры с представителями Европейского космического агентства по поводу их участия в наших работах по космической радиотехнике.

По учебной части Владимир Сергеевич является заведующим кафедрой, которая называется «Телематика». Я уверен, что подавляющее большинство не знает смысла этого термина, но это лишний раз доказывает, что кафедра занимается самыми передовыми технологиями, причем не в смысле обработки информации, а самое главное, — в управлении сетями и объектами с помощью этих сетей.

Владимир Сергеевич провел блестящий эксперимент по управлению нашими роботами и у нас, и даже из Италии. Сейчас он работает над подобными проблемами на МКС и на Земле. Нам смешно слушать предложения об унификации с Европой. У нас есть свое исторически сложившееся лицо, и нам свои преимущества нужно развивать».

Профессор Николай Васильевич Ростов поддержал обоих кандидатов, сказав при этом, что «программы кандидатов не противоречат друг другу в отношении концепции цифрового университета и его общей модернизации. Мне кажется, они должны в дальнейшем оставаться в одной команде, и мы будем рады поддерживать все начинания по модернизации университета»

От имени студенческой профсоюзной организации слово было предоставлено Константину Дмитриевичу Савичеву. Он отметил, что Политехнический университет «был и остается одним из ведущих вузов России, который в 2010 году получил статус национального исследовательского университета и возможность развиваться еще большими темпами».

Даже несмотря на демографический кризис, наш университет продолжает пользоваться огромным спросом у абитуриентов. По итогам поступления в 2010 году иногородние абитуриенты составили уже 60 % и лишь 40 % — выпускники петербургских школ. В связи с этим на первый план выходит проблема нехватки мест в общежитиях, и с каждым годом она будет все острее.

Все острее становится проблема адаптации и приобщения к культуре Санкт-Петербурга наших первокурсников. Необходимо уделять внимание этой проблеме, чтобы в первую очередь защитить самих иногородних студентов.



Приходит осознание факта, что подготовка полноценного специалиста в любой области невозможна не только без современной материальной базы и методического обеспечения, но и без всестороннего физического, культурного, нравственного, творческого и духовного развития личности.

В настоящий момент в Политехническом университете не существует органа, определяющего молодежную политику вуза и координирующего совместную работу различных служб по работе со студентами и молодежью. Хочется, чтобы студенты не только ходили в наш университет на занятия, но и жили с ним одной жизнью!

На встрече студентов с кандидатом в ректоры Андреем Ивановичем Рудским мы получили заверения, что данные вопросы не останутся без внимания и будут рассматриваться наравне с другими проблемами нашего университета».

Подвел итоги обсуждения на конференции ректор СПбГПУ **Михаил Петрович Федоров**, который отметил: «Интересны предложения в области экономики высшей школы, которые выдвинул В.В. Кобзев. Это своевременные и интересные предложения. Они должны быть положены в основу программы развития университета».

Большой опыт в научном бизнесе имеет Н.И. Ватин. Он снял свою кандидатуру, но мы заслушали его на Ученом совете, и его опыт, его интересные предложения должны быть положены в основу программы развития университета.

И В.С. Зaborовский сделал прекрасный доклад о сфере развития телекоммуникаций и информационных технологий. Это тоже должно быть взято на вооружение.

Об Андрее Ивановиче я скажу только одно. Мы с ним работаем уже 8 лет. Вы знаете, что ректору приходится часто отсутствовать на своем рабочем месте (командировки, поездки и т. д.). Все эти годы Андрей Иванович замещал меня и никогда меня не подводил, не подводил университет, и я надеюсь, что это он будет делать и в будущем».

Как и полагается, после обсуждения кандидатур и их программ делегаты приступили к голосованию.

По результатам тайного голосования ректором Санкт-Петербургского политехнического университета был избран доктор технических наук профессор, член-корреспондент РАН **Андрей Иванович Рудской**.

Е.А. Федосов

АВИАЦИОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Авиационная промышленность дореволюционной России

В начале XX века упорное стремление авиаконструкторов-самоучек научить летать аппараты тяжелее воздуха стало давать плоды: на машинах из дерева и полотна с маломощными бензиновыми моторами они выполняли сначала короткие прыжки в воздухе, а потом сравнительно все более продолжительные полеты. В октябре 1908 года А. Фарман совершил по воздуху путешествие дальностью 27 км из одного города в другой, а менее чем через год его соотечественник Л. Блерио на моноплане собственной конструкции стартовал во Франции и, перелетев пролив Ла Манш, приземлился в Англии. В Бильянкуре (Франция) братья Вуазен организовали авиастроительные мастерские, в которых в 1905—

1908 годах по заказам частных клиентов изготавливали около 15 самолетов и планеров. Так началась эра авиации.

Энтузиасты в России также стремились осваивать авиацию. Но это были единичные полеты на иностранных самолетах.

В январе 1910 года председатель созданного Комитета по усилению военного флота на добровольные пожертвования великий князь Александр Михайлович Романов призвал членов Комитета израсходовать оставшиеся в распоряжении Комитета и предназначенные для постройки подводной лодки 900 тысяч рублей на развитие авиации. Этим было положено начало. Русские летчики на первых порах летали на иностранных самолетах. Тем временем в воздух поднялись и первые аэропланы российской



Рис. 1. Первый полет А.С. Кудашева на первом самолете, сконструированном в Российской империи, «Кудашев-1», г. Киев, 1910 г.

постройки. Их конструкторами были А.С. Кудашев (рис. 1), И.И. Сикорский и Я.М. Гаккель (рис. 2).

Российские конструкторы стали создавать способные летать самолеты. Однако это были опытные образцы, еще не пригодные для практического использования.

Если рассматривать самолет как новый вид оружия, то по логике инициировать развитие самолетостроения должно было государство. В конце 1909 года академик Б. Голицын на специальной встрече членов Академии наук с госу-

дарственными чиновниками подверг их критике за бездеятельность в деле развития авиации и предложил создать межведомственную комиссию из представителей власти, науки и общественности с целью объединения усилий в создании научных и экономических основ отечественного авиастроения. Но власть предержащие не поддержали эту идею. «Главным движителем в развитии авиации и воздухоплавания должна стать заинтересованность отдельных лиц и частных учреждений», — таково было мнение главы правительства Петра Столыпина.



Рис. 2. Первый полет самолета Я.М. Гаккеля, 1910 г.



В результате авиапромышленность возникла, как говорится, «снизу». Понимая, что самолет скоро займет важное место в системе вооружений, некоторые российские предприниматели решили основать на своих заводах выпуск крылатых машин. Пионерами отечественного промышленного самолетостроения стали петербургское «Первое российское товарищество воздухоплавания» (ПРТВ), московский завод «Дукс» и рижский Русско-балтийский вагонный завод (РБВЗ).

Эти предприятия стали наиболее крупными в России поставщиками самолетов для военно-го ведомства. Они, как и ряд других, более мелких предприятий, выпускали самолеты преимущественно иностранных моделей.

В это же время появились и организации, в которых собирались первые аэропланы российских изобретателей-конструкторов И.И. Сикорского, Я.М. Гаккеля (рис. 2) и А.А. Пороховщика. Производство этих и других самолетов поддержало Главное инженерное управление (ГИУ) военного ведомства, организованное в 1911 году первый конкурс отечественных аэро-планов для российской армии.

Уже на самом раннем этапе становления отрасли разработчиков ориентировали на создание именно военных аэропланов, а не просто аттракционно-спортивных летательных аппаратов, чем были первые самолеты на заре развития авиа-ции. Именно в России родилась и впервые была практически реализована идея оснащения самолета автоматическим стрелковым оружием для ведения воздушного боя. По некоторым сведе-ниям Пороховщиков уже в 1909 году разработал проект самолета, вооруженного пулеметной установкой. В те же годы Н.Е. Жуковский начал разрабатывать законы баллистики бомб, фунда-ментальные основы отечественной теории бом-бометания, определившей принципы примене-ния тяжелых авиационных бомб, которые уже не сбрасывались, как гранаты, вручную из кабины самолета.

В начале Первой мировой войны Россия по числу военных самолетов (263) не уступала другим воюющим сторонам.

Авиационная промышленность страны Советов. Период количественного роста

В 1918 году авиационные предприятия были национализированы, и 31 декабря 1918 года при ВЧНХ РСФСР образовано Главное управление

авиационных заводов (Главкоавиа). О том, какое большое значение придавалось развитию авиации, свидетельствует учреждение в 1918 году Центрального аэрогидродинамического инсти-тута (ЦАГИ), призванного обеспечить разработ-ку фундаментальных основ и практических ре-комендаций для авиационной науки и техники.

В начале 20-х годов формируются первые в СССР самолетостроительные КБ, начинают развиваться опытное строительство и серийное производство отечественных самолетов. В 1923 году на Государственном авиационном заводе № 1 (ГАЗ № 1, бывший «Дукс») под руководством Н.Н. Поликарпова созданы самолет-разведчик Р-1 и истребитель И-1, поступившие в серийное производство. В 1923 году ГАЗ № 3 «Красный летчик» в Петрограде приступил к се-рийному изготовлению учебного самолет У-1. На этом же заводе возобновил свою конструктор-скую деятельность Д.П. Григорович, выпустив летающую лодку М-24. В 1925–1926 годах ГАЗ № 1 построил десять пятиместных пассажирских са-молетов ПМ-1, что положило начало созданию ГВФ. Созданное в 1922 году при ЦАГИ конструекторское бюро А.Н. Туполева, начав с постройки опытных машин АНТ-1 (смешанная деревянно-металлическая конструкция) и АНТ-2 (цельно-металлическая конструкция), выпустило в 1925 году цельнометаллические разведчик Р-3 и двух-моторный тяжелый бомбардировщик ТБ-1.

В этот же период в системе Осоавиахима нач-нал свою конструкторскую деятельность А.С. Яковлев. Для координации опытных работ в 1926 году при Авиатресте образовано Централь-ное конструкторское бюро с опытными отдела-ми, базировавшимися на серийных заводах. В 1930 году его производственной базой стал Московский авиационный завод № 39.

Развитие советского авиадвигателестроения в 20-е годы первоначально было направлено на освоение серийного производства зарубежных образцов все более высокой мощности с исполь-зованием отечественных материалов и техноло-гий и внесением в их конструкцию различных усовершенствований. К 1926 году на заводе «Мо-тор» А.Д. Швецовым был создан первый совет-ский авиадвигатель — ПД М-11 мощностью 80,9 кВт, использовавшийся на протяжении не-скольких десятилетий в легкомоторной авиации.

К концу 20-х годов объемы производства до-стигли 800–900 самолетов в год. В 1928 году

СССР впервые принял участие в международной авиационной выставке в Берлине. Отечественная авиационная техника успешно прошла проверку в дальних перелетах Москва — Улан-Батор — Пекин (самолеты Р-1, Р-2, АК-1; 1925 г.), Москва — Токио и обратно (АНТ-3; 1927 г.), Москва — Нью-Йорк через Сибирь и Аляску (АНТ-4; 1929 г.).

Еще более бурными темпами советское авиастроение развивалось в 30-е годы. Широким фронтом шло укрепление научно-исследовательской, опытно-конструкторской и производственной базы отрасли. Были образованы Центральный институт авиационного моторостроения и Всесоюзный научно-исследовательский институт авиационных материалов. Плодотворно работало КБ Туполева, где были созданы бомбардировщики ТБ-3 (рис. 3), СБ, ТБ-7, АНТ-25 и АНТ-37.

В этом КБ начиналась деятельность А.А. Архангельского, В.М. Мясищева, В.М. Петлякова, А.И. Путилова, П.О. Сухого и других авиаконструкторов. В 1936 году КБ Туполева с заводом опытных конструкций выделились из ЦАГИ, образовав опытный завод № 156.

Другой крупной конструкторской организацией стало ЦКБ Всесоюзного авиационного объединения. В августе 1931 года ЦКБ подчинили ЦАГИ, где его возглавил С.В. Ильюшин, но с 1933 года оно снова стало базироваться на заводе № 39 и специализировалось в основном на разработке самолетов более легких классов. Здесь работали Н.Н. Поликарпов, А.С. Яковлев, Г.М. Бериев, С.А. Кочеригин, В.А. Чижевский, В.П. Яценко и другие авиаконструкторы. В ЦКБ были созданы такие известные самолеты, как истребители И-15 (рис. 4) и И-16, гидросамолет МБР-2, бомбардировщик ДБ-3 и др.

В развитие ранее принятых решений о строительстве и реконструкции предприятий авиапромышленности в тридцатых годах были введены в эксплуатацию самолетостроительные заводы в Горьком, Воронеже (№ 18), Иркутске, Новосибирске, Комсомольске-на-Амуре, Казани (№ 124), авиамоторные заводы в Перми, Воронеже (№ 16), Казани (№ 27). В числе новостроек были агрегатные и приборные авиационные заводы. Многие предприятия создавались на базе авиаремонтных мастерских, заводов и предприятий другого профиля. Так были образованы самолетостроительные заводы в Арсеньеве (Приморский край), Смоленске, Саратове, Долгопрудном и Химках (№ 301), Ленинграде (№ 47 и № 387). Ряд организаций авиастроения находился в ведении ГВФ. В 1936 году авиастроительные заводы ГВФ начали передаваться в систему предприятий авиационной промышленности, и в этом же году сюда был переведен Центральный институт труда (впоследствии Научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства — НИАТ).

Организация и укрепление научно-исследовательской и опытно-конструкторской базы авиационной отрасли коснулись в этот период и создания авиационного вооружения. Первые коллективы разработчиков авиационных установок стрелкового и бомбардировочного вооружения под руководством В.Ф. Савельева и С.М. Меерсона, сформировавшиеся еще в конце двадцатых годов, были объединены в 1930 году в единое КБ по авиавооружению во главе с А.В. Надашкевичем. В начале 1932 года это КБ было переведено в состав ЦАГИ, значительно при этом расширившись. Именно это время можно считать



Рис. 3. Бомбардировщик ТБ-3



Рис. 4. Истребитель И-15



Рис. 5. Бомбардировщик СБ

рождением самостоятельной вооруженческой подотрасли в рамках отечественного авиастроения. В 1936 году конструкторские бригады по авиавооружению реорганизуются в самостоятельные опытно-конструкторские бюро и переводятся на серийные авиационные заводы. За ЦАГИ сохраняется научно-исследовательское сопровождение разработки авиационного вооружения.

Совершенствовалась и технология авиастроения. Внедрение прогрессивных технологических процессов (пневматическая клепка, точная штамповка, прессование, электросварка и др.) позволило решить задачу организации крупносерийного производства авиационной техники и тем самым увеличить выпуск самолетов. В период 30-х годов было построено свыше 6500 истребителей И-15, И-15бис и И-153, примерно столько же бомбардировщиков СБ (рис. 5) и около 9000 истребителей И-16.

С начала 30-х годов набирает темпы и производство пассажирских самолетов. Парк гражданской авиации пополнили самолеты К-5 (их было изготовлено больше, чем других в этом классе, — свыше 260), ПС-9, АИР-6, ХАИ-1, «Сталь-2» и «Сталь-3», ПС-35, ПС-84 (Ли-2), ряд гражданских модификаций военных самолетов.

Авиационная промышленность в предвоенные годы. Создание новых самолетов

Анализ участия нашей боевой авиации, созданной в 30-е годы, в воздушной войне в Испании и в Финской кампании показал ее низкую эффективность по сравнению с авиацией Германии, которая воевала на стороне противника. В основном это проявилось в воздушных боях истребителей И-15 и И-16 с только что созданным в Германии истребителем Мессершмитт Ме-109.

В начале 1940 года, когда мы только приступили к испытаниям новых опытных самолетов, несколько групп советских специалистов побывали в Германии.

Поездки в Германию, пополнившие наше представление о немецкой авиации и авиапромышленности, привели к важным выводам. Стало ясно, что если взять все заводы, о которых мы знаем, в самой Германии и в оккупированных ею или зависимых от нее странах, то можно считать, что гитлеровцы обладают значительно более

мощной авиапромышленностью и способны еще увеличить производство авиационной техники.

27 марта 1940 года вышло Постановление ЦК ВКП(б) и СНК СССР об опытном самолетостроении и моторостроении, которое поставило задачу создать самостоятельную инфраструктуру опытного строительства. Создавались опытное производство, летно-испытательные службы. Был организован Летно-исследовательский институт, который возглавил знаменитый летчик-испытатель Герой Советского Союза М.М. Громов.

Масштаб организационной работы в этот период характеризуется такими цифрами: в 1940 году было принято более 300 Постановлений и Решений ЦК ВКП(б) и СНК СССР, а в 1941 году — 488, посвященных организации производства новых самолетов и моторов, агрегатов и приборов. В середине 1940 года все заводы должны были прекратить выпуск старой продукции и перейти на новую, более сложную. Перестройка охватила все авиационное производство. Страна отдавала авиационной промышленности самое лучшее (металл, текстиль, резину, топливо, горюче-смазочные материалы, лаки и краски и т. д.).

Напряженно трудились коллективы научно-исследовательских институтов. ЦАГИ в своих аэродинамических трубах продувал модели новых самолетов вплоть до натуральных размеров. М.В. Келдышем была решена проблема флаттера. ВИАМ решал проблему защиты от коррозии металлических конструкций, разрабатывал авиационную броню. ЦИАМ активно участвовал в испытаниях и отработке авиационных моторов и топлив.

Институты вместе с опытно-конструкторскими бюро работали как единые команды по

строительству новых самолетов. К конструкторским бюро А.Н. Туполева, С.В. Ильюшина, П.Н. Поликарпова присоединились новые конструкторские бюро и группы, в которых разрабатывались боевые машины. Молодые инженеры А.И. Микоян и М.И. Гуревич, С.А. Лавочкин с В.П. Горбуновым и М.И. Гудковым, А.С. Яковлев, М.М. Пашинин, В.П. Яценко, В.К. Таиров и другие соревновались между собой и с более опытными конструкторами за право запустить свой самолет в серию.

Самолет МиГ Микояна и Гуревича был создан в течение шести месяцев от начала проектных работ до изготовления опытного образца и показал очень хорошие летные характеристики. Он развивал на высоте 7 километров скорость 640 км/час, которую не достигал ни один отечественный и зарубежный боевой самолет. Самолет оказался хорошим ночным истребителем-перехватчиком, поступившим в войска ПВО Москвы и Ленинграда. МиГ-1 (рис. 6) и последовавший за ним МиГ-3 пошли в серию и вскоре стали выпускаться в больших количествах.

Лавочкин со своими соратниками построили истребитель ЛаGG-3 (рис. 7). Первый опытный образец самолета вышел на испытания в марте 1940 года. Отличительной особенностью конструкции было широкое применение нового тогда материала — дельта-древесины. Такой подход к проектированию был вынужденным, поскольку возможности цветной металлургии СССР не поспевали за резко возросшими в предвоенные годы потребностями самолетостроения. Единственный путь — это использование дерева. Оно в разной степени применялось и в конструкциях других самолетов, в частности Як-1 (рис. 8.) и МиГ-3.



Рис. 6. Истребитель МиГ-1

В это время в КБ А.С. Яковлева разрабатывался знаменитый Як, самый массовый истребитель Великой Отечественной войны. Истребитель был задуман с хорошей возможностью модификации его в широком диапазоне целевого назначения.

Весной 1940 года было дано задание на проектирование фронтового пикирующего бомбардировщика Андрею Николаевичу Туполеву. Уже осенью известный Ту-2 построили, а в январе 1941 года испытали.

Перед войной В.М. Петляков создал хорошо известный бомбардировщик Пе-2. Это был двухмоторный трехместный самолет, по скорости значительно превышающий все предыдущие самолеты этого типа. Пикирующий бомбардировщик Пе-2 (рис. 9) верой и правдой служил нашим ВВС всю войну.

Николай Николаевич Поликарпов — основоположник конструирования отечественных самолетов-истребителей И-15 и И-16. Они были сняты с производства, так как уступали по скорости знаменитому Ме-109. Однако истребители Н.Н. Поликарпова приняли участие в первый период Великой Отечественной войны, так как они составляли основу советской истребительной авиации. Но один самолет Н.Н. Поликарпова воевал всю войну. Это был У-2 — учебно-тренировочный самолет, названный после смерти Н.Н. Поликарпова в 1944 году По-2, который составлял основу легкой ночной бомбардировочной авиации. Увидев По-2 на фронте, гитлеровцы сначала смеялись, надеяясь неказистый самолет презрительными кличками вроде «русс-фанер». Но маленький тихоход оказался превосходным ночным бомбардировщиком, особенно в условиях близкого соприкосновения с противником.



Рис. 7. Истребитель ЛаGG-3



Рис. 8. Истребитель Як-1



Рис. 9. Бомбардировщик Пе-2

Сергей Владимирович Ильюшин конструировал в это время совершенно новую машину — штурмовик (рис. 10). Самолет предназначался для действия в прифронтовой полосе, в тесном взаимодействии с пехотой, прежде всего против наземного противника, в том числе и танков врага.

Говоря о новых самолетах, их конструкторах, нельзя не вспомнить и тех, кто эти самолеты поднимал в воздух, давал им нужные скорости и высоту. Жизнь самолету дает мотор. У нас к началу войны были двигатели, не уступавшие лучшим зарубежным образцам. Этим мы обязаны их творцам — конструкторам, ученым и заводским коллективам.

Талантливым конструктором двигателей был Владимир Яковлевич Климов. Взяв в свое время за основу мотор водяного охлаждения «Испано-Сюиза», Климов добился результатов, каких не смогла добиться сама эта фирма.

Аркадий Дмитриевич Швецов конструировал двигатели воздушного охлаждения, которые применялись на истребителях. Главным потребителем двигателя М-11 стали в войну самолеты Лавочкина.

Третий конструктор авиационных двигателей из этой когорты — Александр Александрович Микулин. Его моторы АМ-34, потом АМ-35 и перед самой войной АМ-38 устанавливались на тяжелых бомбардировщиках и штурмовиках Ильюшина.

Для дальней бомбардировочной авиации использовали мотор М-88 конструкторского бюро Евгения Васильевича Урмина.

В середине 1940 года почти на всех заводах, производивших авиационную технику, готовились к выпуску новых самолетов. Новые самолеты и моторы значительно отличались от ста-

рых и это делало их серийный выпуск исключительно трудным.

Очень важным моментом было обеспечение идентичности при массовом производстве самолета. Вместе с рождением новых самолетов появился плазово-шаблонный метод.

Еще одна важная задача, которую удалось решить в преддверии войны: авиационная промышленность перешла на работу по суточному графику.

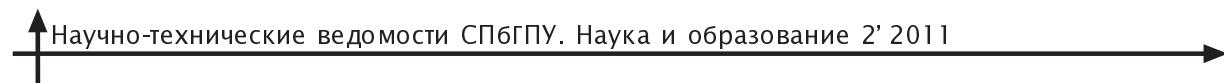
Суточный график очень дисциплинировал. К началу 1941 года по суточному графику стали работать все самолетные и моторные заводы.

К началу войны авиационная промышленность выпускала более 50 самолетов в день. В июле 1941 года изготовили 1807 самолетов за месяц, а значит, 60 в день. В сентябре 1941 года сделали 2329 боевых машин — более 70 в день. Правда, потом в связи с эвакуацией заводов в глубокий тыл выпуск стал падать, но в дальнейшем довели его до 100 и более самолетов в сутки.

Если оценивать готовность к войне по освоению новых самолетов, то такая готовность была. Авиационная промышленность работала очень



Рис. 10. Штурмовик Ил-2



четко, ритмично, все время наращивая выпуск продукции. Когда приходится слышать, что новые самолеты появились у нас только во второй половине войны, то совершенно очевидно, что утверждают это люди малокомпетентные, слабо разбирающиеся в технике, не понимающие, что такую технику создать в ходе войны уже невозможно. Если бы нас война застала со старой техникой на стапелях, то никакими усилиями мы бы уже серийное производство новых самолетов освоить не могли.

Авиационная промышленность встретила войну во всеоружии, с такой авиационной техникой и в таких производственных цехах, которые обеспечили в конечном счете победу над гитлеровским «люфтваффе».

Совершенствование боевой авиации в ходе Великой Отечественной войны

Великая Отечественная война стала тяжелым испытанием для всего советского народа, в том числе и для авиационной промышленности.

Вероломное нападение гитлеровской Германии на СССР привело к значительным потерям советской авиации. Только за первые 8 часов войны были потеряны 1200 самолетов, произошла массовая гибель летного состава, были уничтожены хранилища и все запасы. Против Советского Союза были брошены почти все наличные силы гитлеровской авиации, в том числе и части, снятые с Западного фронта. Трагичным моментом было то, что практически вся боевая авиация Советского Союза, кроме дальней бомбардиро-

вочной, была выдвинута к западным границам, создав «скученность» на аэродромах накануне войны, что значительно увеличило потери.

К октябрю 1941 года армии вермахта подошли к Москве, были заняты города, поставляющие комплектующие для авиазаводов. Требовалась срочная эвакуация всех авиапредприятий из западных и центральных районов европейской части СССР. Местами новой дислокации авиационных предприятий стали Куйбышев, Казань, Чкалов, Уфа, Омск, Новосибирск, Иркутск, Тбилиси, Ташкент и другие города. Всего было перебазировано около 85 % предприятий авиационной промышленности страны.

В масштабах страны эвакуация затронула более полутора тысяч предприятий и 10 миллионов человек. Мировая история не знала ничего подобного.

9 ноября 1941 года Государственный Комитет Обороны утвердил графики восстановления и пуска эвакуированных заводов и планы производства. Была поставлена задача, не только восстановить выпуск самолетов, но и значительно увеличить их количество и качество. В тяжелейших условиях, под бомбами, в холод и стужу сибирских зим один за другим были пущены заводы-дублеры. Уточнялись, упрощались технологии, находили применение новые виды материалов, за станки встали женщины и подростки. В ходе войны в серийном производстве были развернуты усовершенствованные образцы боевых самолетов: Як-7Б, Як-9 (рис. 11), Як-3, Ла-5, Ла-5Ф, Ла-7 двухместный вариант Ил-2, Ил-10, Ил-4 (рис. 12) и др.



Рис. 11. Истребитель Як-9



Рост объемов выпуска авиационной техники потребовал применения поточной и поточно-конвеерной сборки самолетов и двигателей, а также других высокопроизводительных технологических процессов.

В середине 1942 года авиационная промышленность уже располагала новой надежной материально-технической базой.

Итоговая оценка наших ВВС в период 1942–1943 годов, которую давало немецкое командование, была следующей: «Процесс восстановления ВВС РККА, начавшийся осенью 1941 года после сокрушительных ударов немецких войск, в течение следующих лет неуклонно возрастал. Принимая во внимание, что 1942 год прошел под знаком полного превосходства в воздухе авиации Люфтваффе, к концу 1943 года ситуация кардинальным образом изменилась. К этому времени русские научились извлекать выгоду из своего значительного численного преимущества и во многих конкретных случаях доминировали в воздушном пространстве над полями некоторых крупных сражений... Практически неограниченные ресурсы в личном составе, материальной части и топливе позволяли ВВС РККА концентрировать над своими наступающими наземными войсками большое количество бомбардировщиков и штурмовиков с сильным истребительным эскортом. В то время как советские ВВС становились все более агрессивными, Люфтваффе, наоборот, вынуждены перейти к обороне. По сравнению с 1941 годом ситуация изменилась радикально».

Самолеты многих типов строились тысячами и десятками тысяч. До конца войны с Германией было выпущено (округленно): штурмовиков Ил-39 тысяч, истребителей Як – 36 тысяч, ЛаГГ и Ла – 22 тысячи, МиГ-3 – 3 тысячи, бомбардировщиков Пе-2 – 11 тысяч, ДБ-3 (Ил-4) – 6,5 тысяч, Ту-2 – 0,8 тысяч.

Отечественная авиационная промышленность в послевоенные годы.

Период качественного развития

В послевоенный период в СССР, как и в других ведущих странах мира, началось качественное развитие авиации, создание авиационной техники нового поколения — реактивной авиации. Увеличилась доля НИИ и ОКБ в общем числе предприятий авиационной промышленности.



Рис. 12. Бомбардировщик Ил-4

База опытного авиастроения, основу которой после войны составили коллективы, руководимые А.Н. Туполовым, Яковлевым, Ильюшиным, Бериевым, Лавочкиным, Микояном, Сухим, Климовым, Швецовым, В.А. Добрининым, Микулиным, в последующий период непрерывно развивалась. Ее пополнили новые КБ, которые возглавили О.К. Антонов, М.Л. Миль, Н.И. Камов, В.М. Мясищев, А.Г. Ивченко, Н.Д. Кузнецов, А.М. Люлька. Большой вклад в развитие подотраслей агрегато- и приборостроения, занимающихся созданием средств жизнеобеспечения, энергоснабжения, пилотажно-навигационного оборудования, САУ, гидравлической и других систем, принадлежит специализированным КБ. Основные предприятия-разработчики авиационной техники, как правило, обеспечивались собственной производственной базой и приобретали статус опытно-конструкторских бюро (ОКБ), опытных заводов, научно-производственных объединений. В последующем к руководству ведущими ОКБ в 60–70 годы стали приходить новые главные и генеральные конструкторы — П.А. Соловьев, С.К. Туманский, С.П. Изотов, П.А. Колесов, В.А. Лотарев, Г.В. Новожилов, М.Н., Тищенко Р.А. Беляков, А.А. Туполев, С.В. Михеев, М.П. Симонов, В.М. Чепкин, П.В. Балабуев и др. Возрос научный потенциал отрасли. Укреплялась экспериментальная база ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ, НИАТ, ЛИИ. В 1946 году были образованы НИИ-2 (впоследствии Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем — ГосНИИАС), Государственный союзный сибирский научно-исследовательский институт авиации (СибНИА), Всесоюзный институт легких сплавов (ВИЛС), Научно-исследовательский

институт авиационного оборудования (НИИАО) и другие отраслевые НИИ.

В первые послевоенные годы в СССР закладывалась база развития реактивной авиации — велись интенсивные исследования по аэродинамике больших скоростей, устойчивости, управляемости и прочности скоростных самолетов, газодинамике ВРД, разрабатывались жаропрочные материалы для ГТД.

Первыми советскими реактивными самолетами стали истребители МиГ-9 и Як-15, созданные в 1946 году. Во второй половине 40-х в производство запущены реактивные истребители МиГ-15 (первый в СССР серийный самолет со стреловидным крылом), Ла-15, Як-23, реактивные бомбардировщики Ил-28, Ту-14.

В 50-х годах в серийном производстве были освоены турбореактивные и турбовинтовые двигатели, разработанные под руководством Люльки (АЛ-7), Климова (ВК-1, ВК-1Ф), Микулина (АМ-3, АМ-5, РД-9Б), Кузнецова (НК-12), Ивченко (АН-20), Добринина (ВЦ-7), Туманского (Р11-300, Р11Ф-300), Соловьева (Д-25В).

В классе истребителей были выпущены МиГ-17, Як-25, МиГ-19 (первый в СССР сверхзвуковой серийный самолет), Су-7, МиГ-21 (рис. 13), Су-9, Як-28.

На вооружение поступили стратегические и дальние бомбардировщики — турбовинтовой Ту-95 и реактивные Ту-16 (рис. 14), М-4, ЗМ и турбовинтовые транспортные самолеты Ан-8, Ан-12.

Создание и внедрение в серию производительных (благодаря большей скорости и пассажировместимости) пассажирских самолетов — реактивного Ту-104 (рис.15) и турбовинтовых Ил-18, Ту-114, Ан-10 — дало импульс интенсивному развитию воздушного транспорта в стране.

Расширился типаж серийных вертолетов. В классе транспортных машин были созданы Ми-4, Як-24, Ми-6 — первый советский вертолет с ГТД (Д-25В), а в более легкой весовой категории — корабельный Ка-15 и его гражданские модификации Ка-15М и Ка-18.

В 60-е годы создан ряд принципиально новых образцов авиационной техники с существенно возросшими летно-техническими характеристиками или более широкими эксплуатационными возможностями (так называемое третье поколение реактивной авиации). В числе летательных аппаратов новых типов были СВВП Як-36, Як-38, истребитель с крылом изменяемой в полете стреловидности МиГ-23 (рис. 16), большегрузный транспортный самолет Ан-22 «Антей», специализированный вертолет-кран Ми-10К.

Самолет-амфибия Бе-12, самолет Ан-24 (пассажирский для МВЛ) и его модификации Ан-26 (транспортный). Начато производство вертолетов легкой и средней весовых категорий — Ми-2, Ка-25, Ка-26, Ми-8 (рис. 17). Многие научно-технические проблемы были решены при разработке сверхзвукового пассажирского самолета Ту-144, прошедшего опытную эксплуатацию.



Рис. 13. Истребитель МиГ-21



Рис. 14. Бомбардировщик Ту-16



Рис. 15. Пассажирский самолет Ту-104



Рис. 16. Истребитель МиГ-23



Рис. 17. Вертолет Ми-8

Парк гражданской авиации стал пополняться в основном реактивными самолетами. Для магистральных авиалиний в производство поступили пассажирские самолеты Ту-134, Ил-62, Ту-154, а для местных воздушных линий (МВЛ) — Як-40.

Среди боевых самолетов значительным достижением стало создание истребителя МиГ-25 (рис. 18), скорость полета которого в три раза превысила скорость звука. В числе других самолетов военного назначения, выпущенных в этот период, были истребители Су-11, Су-15, сверхзвуковой бомбардировщик Ту-22.

Значительное число усовершенствованных и новых ЛА в стране было создано в последующие 70—80-е годы. В ряду самолетов и вертолетов новых поколений или новых типов были: ближнемагистральный пассажирский самолет Як-42 и первый советский широкофюзеляжный пассажирский самолет-аэробус Ил-86 (рис.18); грузовой реактивный самолет Ил-76Т; большегрузные транспортные самолеты Ан-124 «Руслан» (150 т) и Ан-225 «Мрия» (250 т); сверхзвуковой фронтовой бомбардировщик Су-24 и армейский

штурмовик Су-25 (рис. 19); высокоманевренные истребители МиГ-29 и Су-27; истребитель-перехватчик МиГ-31; многорежимный стратегический бомбардировщик Ту-160; вертолеты — транспортно-боевой Ми-24, многоцелевой корабельный Ка-27, боевой Ми-28, Ка-50 и Ка-52, транспортный Ми-26 с наивысшей в мире для серийных машин грузоподъемностью (20 т).

В конце 80-х годов начались подготовка и освоение серийного производства пассажирских



Рис. 18. Истребитель МиГ-25



Рис. 19. Пассажирский самолет-аэробус Ил-86

самолетов нового поколения с высокой топливной эффективностью Ил-96-300, Ту-204 и Ту-214 для магистральных авиатрасс и Ил-114 для МВД.

Вершиной развития советской авиационной промышленности стали 70–80-е годы.

Новейшая история авиационной промышленности России

Качественно новые условия, в которых оказалась российская авиационная промышленность после распада СССР, не изменили общую ориентацию ее развития, направленную на существенное совершенствование. Это относится и к методам разработки авиационной техники, и к технологии ее производства, и к самой технике. К числу качественно новых образцов авиационной техники относятся самолеты и вертолеты, созданные в этот период российской авиационной промышленностью: фронтовой бомбардировщик Су-34, учебно-тренировочный самолет ВВС МиГ-АТ, многоцелевой гражданский вертолет Ми-38, военный вертолет Ка-60 (рис. 20) и его гражданский вариант Ка-62 (фирма «Камов»), учебно-боевой Як-130, тяжелый многоцелевой самолет гидроавиации Бе-200 и легкий гидросамолет Бе-103 (ТАНТК им. Бериева).

Но 90-е годы характеризуются глубоким кризисом, в котором оказалась авиационная про-

мышленность. Резко сократился оборонный заказ. Если до 1991-го выпускались сотни боевых самолетов и вертолетов в год на более чем десяти авиационных заводах, то в 90-е годы закупки со стороны Министерства обороны почти не проводились. Единственным выходом стал экспорт боевой авиации. Благодаря высоким характеристикам разработанных в советское время самолетов МиГ-29, Су-27 и Су-30 (рис. 21), вертолетов Ми-8, Ми-17 и Ми-24, Россия уверенно держит почти 20 % мирового рынка боевой авиации.

По сути, экспорт удержал авиационную промышленность от полного раз渲ла. С продажей гражданских самолетов дело обстоит гораздо драматичнее. Авиационная промышленность России в основном поставляла гражданские самолеты на внутренний рынок и в страны Восточной Европы. С разрушением СССР и образованием стран СНГ последние, как и страны Восточной Европы, стали ориентироваться на международный глобальный авиационный рынок. Таким образом, авиационная промышленность России, по существу, оказалась перед фактом жесткой конкуренции на общемировом рынке гражданских самолетов. Этот рынок регулируется общими мировыми авиационными правилами, которые строятся на единой между-



Рис. 20. Вертолет К-60



Рис. 21. Истребитель СУ-30

народной нормативной базе. Это касается особенностей процессов международной сертификации самолетов, организации логистической системы послепродажного технического обслуживания в разветвленной по всему миру сети технических центров, лизинговых форм продажи и покупки самолетов, международной системы страхования закупок и т. д.

Именно эти факторы являются определяющими механизмами международного рынка гражданских самолетов.

С переходом на рельсы рыночной экономики было ликвидировано Министерство гражданской авиации. Вся инфраструктура послепродажного обслуживания и эксплуатации и единый авиаперевозчик «Аэрофлот» распались на сотни акционерных компаний, что привело к полному

разрушению инфраструктуры технического обслуживания. Падение уровня жизни населения резко сократило пассажиропоток. Если до 1991-го перевозили более 100 млн пассажиров в год, то с 1993-го пассажиропоток не превышает 25–26 млн пассажиров в год. Произошел некоторый рост перевозок на международных линиях, но очень резко упали перевозки на местных, а в ряде районов просто прекратились. Все это привело к тяжелому экономическому положению компаний-авиаперевозчиков и неспособности их покупать новые самолеты, а в основном — кориентации на лизинг «секонд-хенд» самолетов западного производства с техническим обслуживанием за рубежом. Поэтому в настоящее время внутренний рынок гражданских самолетов отечественного производства практически разру-



Рис. 22. Пассажирский самолет Ту-214

шен. Авиационная промышленность выпускает самолеты Ту-204, Ту-214 (рис. 22), Ил-96-300 единицами штук в год.

Выход из кризиса необходимо искать в организации структурной перестройки и управления авиационной промышленностью.

Основное положение разработанной стратегии развития авиационной промышленности на ближайшие годы — интегрирование авиационной промышленности России в единый мировой глобальный рынок авиации в качестве третьей мировой авиационной державы после США и объединенной Европы и организация интегрированных структур в авиационной промышленности. Самолетостроительная часть авиационной промышленности образовала объединенную авиационную корпорацию (ОАК) на базе организаций, обладающих мировыми брендами («Су», «МиГ», «Ил», «Ту», «Як»), заводов, производящих их продукцию, и лизинговых компаний. Вертолетное производство интегрировано в «Вертолеты России». Авиационное двигателестроение интегрируется в объединенную двига-

тельную корпорацию (ОДК) с частичной диверсификацией, так как загрузка только авиационной тематикой не обеспечивает им устойчивое положение на мировом рынке. То же происходит в приборостроении и агрегатостроении, где созданы корпорации «Авиаприборостроение» и «Агрегатостроение». Приборные и агрегатные предприятия должны быть значительно диверсифицированы и ориентироваться на широкий спектр выпуска продукции не только авиационного профиля.

Стратегия развития авиационной промышленности была рассмотрена и одобрена на президиуме Госсовета Российской Федерации.

Россия, как и все авиационные державы, строит будущее развитие своей авиационной промышленности на партнерстве государства и частного бизнеса. Причем государство поддерживает научную инфраструктуру авиапромышленности финансированием из бюджета через ФГП, созданием системы налоговых и других преференций, системы защиты своего производителя на мировом рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федосов, Е.А.** Авиационная промышленность [Текст] / Е.А. Федосов.— Энциклопедии «Военно-промышленный комплекс».— М.: Военный парад, 2005.
2. **Шахурин А.И.** Сокрушение люфтваффе. Воспоминание наркома авиапромышленности [Текст] / А.И. Шахурин.— М.: ЭОН, 2004.
3. **Минаев, А.В.** Самолеты СССР [Текст] / А.В. Минаев.— М.: Военное издательство МО, 1961.
4. Военно-воздушные силы России. Неизвестные документы (1931–1967 гг.) [Текст].— М.: Вестник воздушного флота, 2003.
5. Русский архив Великой Отечественной войны [Текст]. Т. 15. — М.: Терра, 1997.
6. **Корнуков, А.М.** Военно-воздушные силы Отечества. Этапы большого пути [Текст] / А.М. Корнуков // Военно-исторический журнал. 2001. № 5.
7. **Яковлев, А.С.** Цель жизни (записки авиаконструктора) [Текст] / А.С. Яковлев.— М.: Издательство политической литературы, 1973.
8. **Шавров, В.Б.** История конструкций самолетов в СССР 1938–1950 гг. [Текст] / В.Б. Шавров.— М.: Машиностроение, 1978.
9. Самолетостроение в СССР 1917–1945 гг. [Текст] / Кн. 2.— М.: Изд. отдел ЦАГИ, 1994.
10. **Алексеенко, В.И.** Советские ВВС накануне и в годы Великой Отечественной войны [Текст] / В.И. Алексеенко // Авиация и космонавтика.— 2000.— № 4.



ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.314:

В.Н. Козлов, И.У. Тросько

АНАЛИЗ ХАОТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье на основе математической модели электромагнитных процессов электроэнергетической системы (ЭЭС) описаны условия возникновения хаотических режимов. Модель включает дифференциальные уравнения синхронного генератора, турбины и линии передачи, предложенные А.А. Горевым. Определены условия возникновения хаотических режимов при определенных значениях параметров модели системы. Хаотический режим, характеризующийся быстро нарастающими и неуправляемыми колебаниями фазовых координат, создает аварийные условия. Отмечена важность своевременной диагностики подобных процессов с целью своевременного изменения структуры системы или логики управления.

Постановка задачи

Современные ЭЭС представляют собой сложный комплекс источников энергии, линий передачи и потребителей. Каждая из частей ЭЭС в свою очередь — сложная система со своей динамикой и ограничениями различного рода.

В работе [1] было отмечено, что при определенных условиях наблюдается процесс самовозбуждения синхронной машины. С целью иллюстрации данного явления автором рассматривалась система, приведенная на рис. 1, а. При определенных сочетаниях характеристик генератора, линии передачи и нагрузки экспериментально наблюдался эффект самовозбуждения системы, графики некоторых переменных при котором приведены на рис. 1, б.

Основной результат, полученный в [1], состоит в формулировке условия самовозбуждения синхронной машины. Сущность условия состоит в том, что для возникновения этого режима

угловая частота вращения ротора должна быть расположена между собственными частотами контуров, образованных из внешней емкости и крайних значений индуктивности машины. Отмечено, что в отличие от обычной колебательной цепи с постоянными параметрами, для которой характерны дискретные резонансные точки, рассматриваемая цепь в данном случае имеет сплошной спектр резонансных частот, образующих непрерывный конечный интервал. Это справедливо при работе синхронной машины на средоточенную и распределенную емкостную нагрузки.

Возникновение самовозбуждения приводит к тому, что станция с синхронными генераторами, имеющая определенные ограничения по мощности (варирующиеся в зависимости от технологии эксплуатации), может устойчиво работать только на линию передачи, длина которой не превышает некоторое критическое значение l_{kp} . В противном случае необходимо применять искусственные мероприятия для сохранения работоспособности ЭЭС:

увеличение номинальной мощности станции (генератора), что приводит к уменьшению синхронной реактивности и соответствующему росту критической длины линии [1]. Однако этот способ не всегда экономически оправдан;

применение различных компенсирующих устройств (FACTS) (синхронные компенсаторы, управляемые шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы, сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (СПИНЭ) и их комбинации [9–11]), что увеличивает собственную частоту линии и сдвигает области самовозбуждения в диапазон больших частот, увеличивая тем самым допустимую дли-

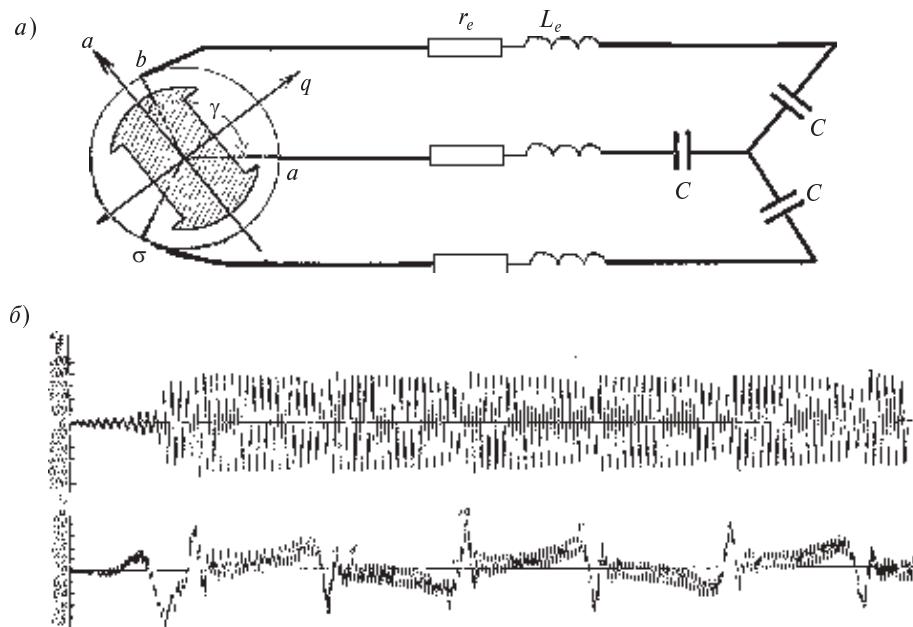


Рис. 1. Синхронная машина, работающая на емкостную нагрузку, (а) и процесс самовозбуждения (б)

ну. Однако, кроме улучшения динамических характеристик линий передач, это приводит к потерям энергии, которые достигают долей или единиц процентов от номинальной мощности [12].

В работах [2, 8] рассмотрена модель ЭЭС с учетом системы управления турбиной и системы регулирования возбуждения генератора. При определенных условиях эта модель позволяет исследовать сложные динамические режимы, однако ее содержательное применение для анализа хаотических режимов затруднено в силу линейности основных уравнений. Цель разработки адекватной модели — сделать ее направленной на решение проблемы квазиоптимального управления частотой и активной мощностью ЭЭС для анализа и синтеза нелинейных систем ограничения перетоков активной мощности и регулирования частоты и обменной мощности.

В работе [3] предложена математическая модель синхронного генератора, которая после ряда преобразований приведена к виду, математически эквивалентному уравнениям Лоренца — классическому примеру описания систем, для которых характерно хаотическое поведение при определенных значениях параметров. В [4] предложен другой метод построения математической модели ЭЭС — на основе совокупности

синхронных генераторов, асинхронных и синхронных двигателей. Там же приведены данные по относительной мощности электрических машин различного типа, используемых в промышленности и быту (в процентах от общего баланса мощности):

Асинхронные двигатели	75
Синхронные двигатели	20
Другие типы электрических машин (включая стартовые двигатели постоянного тока и электротранспорт)	5

Показано, что в большой ЭЭС отдельные электрические машины не влияют друг на друга, а синхронизируя друг друга, ведут себя как одна большая электрическая машина. Это обосновывает использование линии бесконечной мощности в качестве типового элемента схем ЭЭС.

Однако данное утверждение справедливо лишь при компактном расположении источников и потребителей электрической энергии, когда влиянием линий передач можно пренебречь без видимого искажения физического смысла изучаемого явления. В предлагаемой работе мы показываем это на примере несколько схематизированной, но в основных чертах соответствующей реальности модели ЭЭС. Данная



структура модели — типовая для проведения исследований динамики энергетических систем при различных условиях эксплуатации [5, 6].

Структура исследуемой системы и математические модели ее элементов

Для построения математической модели ЭЭС мы будем ориентироваться на топологию сети, приведенную на рис. 2 (соответствует IEEE second benchmark model-System-1) [5].

В модели заданы параметры, определяющие глобальные динамические характеристики изучаемой системы: степень компенсации индуктивности μ ; T_m — механический вращающий момент (фактически это мощность, подводимая к системе); E_{fd} — напряжение возбуждения; V_0 — уровень напряжения в сети. При обсуждении результатов расчетов значения этих параметров будут заданы.

Кроме топологии сети, на функционирование ЭЭС существенное влияние оказывает автоматическая система управления напряжением и частотой/мощностью (AVR and PSS), обеспечивающая постоянство напряжения на выходе синхронного генератора и стабилизацию

частоты его вращения. Схема этого устройства приведена на рис. 3 [6].

Схема синхронного генератора, на основании которой были получены используемые авторами уравнения токов, приведена на рис. 4.

Математическую модель токов генератора в переменных, приведенных к $d-q$ осям [7], запишем в виде уравнений (1)–(5).

A. Токи, циркулирующие в синхронном генераторе (фазовые координаты системы: $i_d, i_q, i_f, i_{kq}, i_{kd}$ — два фазных тока, ток в обмотке возбуждения и токи в двух демпферных обмотках), удовлетворяют уравнениям

$$\begin{aligned} -\left(X_d + X_e\right) \frac{di_d}{dt} + X_{afd} \frac{di_f}{dt} + X_{akd} \frac{di_{kd}}{dt} = \\ = \omega_0 \left((r_a + R_e) i_d - (X_e + \omega X_q) i_q + \right. \\ \left. + \omega X_{akd} i_{kq} + V_0 \sin \delta + v_{cd} \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} -\left(X_q + X_e\right) \frac{di_q}{dt} + X_{akd} \frac{di_{kd}}{dt} = \\ = \omega_0 \left(V_0 \cos \delta + v_{cq} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

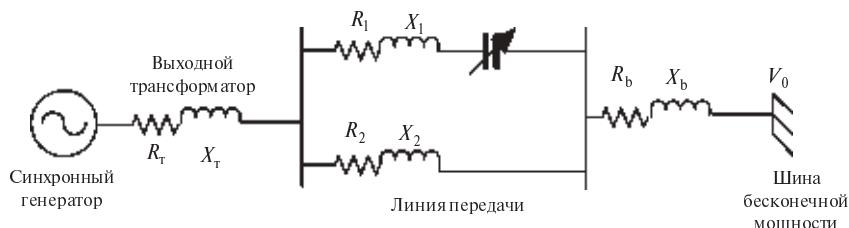


Рис. 2. Схема модели ЭЭС

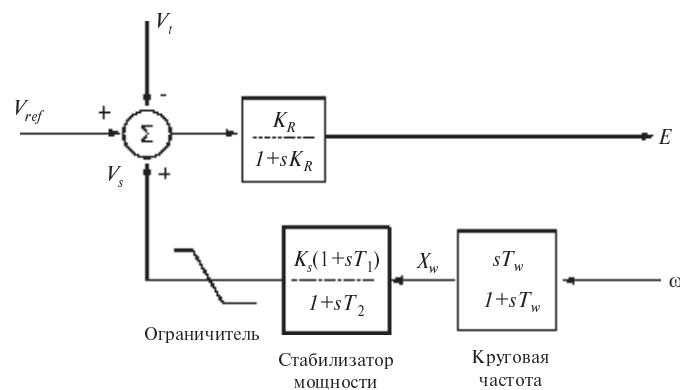


Рис. 3. Схема регулятора напряжения и стабилизатора мощности синхронного генератора [6]

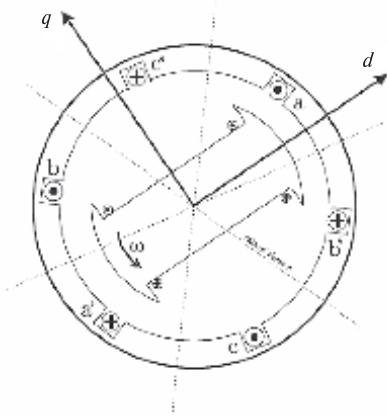


Рис. 4. Схема перехода от трех фазных токов к двухтоковой системе

$$-X_{afd} \frac{di_d}{dt} + X_{ffd} \frac{di_f}{dt} + X_{fkd} \frac{di_{kd}}{dt} = -\omega_0 \left(r_{fd} i_f - r_{fd} \frac{E_{fd}}{X_{afd}} \right); \quad (3)$$

$$-X_{akd} \frac{di_d}{dt} + X_{kkd} \frac{di_{kd}}{dt} = -\omega_0 r_{kq} i_{kq}; \quad (4)$$

$$-X_{akd} \frac{di_d}{dt} + X_{fkq} \frac{di_f}{dt} + X_{kkd} \frac{di_{kd}}{dt} = -\omega_0 r_{kq} i_{kd};$$

$$V_q = -R_a i_q - X_d i_d + X_{afd} i_{fd}. \quad (5)$$

Здесь введены обозначения

$$k = \frac{\sqrt{(R_1^2 + X_{l2}^2)}}{\sqrt{((R_1 + R_2)^2 + (X_{l1} + X_{l2} - \mu X_{l1})^2)}},$$

$$X_e = X_t + k X_{l1} + X_b;$$

$$R_e = R_t + k R_{l1} + R_b; \quad \mu = X_c / X_{l1}.$$

B. Линия передачи (фазовые координаты v_{cq}, v_{cd}):

$$\frac{dv_{cd}}{dt} = \omega_0 (\mu k X_{l1} i_d + v_{cq}); \quad (6)$$

$$\frac{dv_{cq}}{dt} = \omega_0 (\mu k X_{l1} i_q - v_{cd}). \quad (7)$$

C. Механическая часть ЭЭС (генератор, чьи фазовые координаты δ, ω – угол скольжения генератора относительно синхронных осей и отно-

сительная частота вращения в долях синхронной круговой частоты ω_0) описывается уравнениями

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 (\omega - 1); \quad (8)$$

$$M_3 \frac{d\omega}{dt} = D_3 (1 - \omega) + K_{34} (E - \delta) - K_{23} \delta + T_m - T_e, \quad (9)$$

где $T_e = (X_q - X_d) i_d i_q + X_{afd} i_f i_q - X_{akq} i_{kq} i_d + X_{akd} i_{kd} i_q$.

D. Автоматический регулятор напряжения и мощности (фазовые координаты X_w, V_s, E) имеет следующее описание:

$$T_w \left(\frac{dX_w}{dt} - \frac{d\omega}{dt} \right) = -X_w; \quad (10)$$

$$T_2 \frac{dV_s}{dt} - T_1 K_s \frac{dX_w}{dt} = K_s X_w - V_s; \quad (11)$$

$$T_r \frac{dE}{dt} = K_r (V_{ref} + V_s - V_t) - E, \quad (12)$$

где $V_t = \sqrt{(V_d^2 + V_q^2)}$, $V_d = -R_a i_d + X_q i_q$,
 $V_q = -R_a i_q - X_d i_d + X_{afd} i_{fd}$.

Результаты исследования хаотических режимов

Для моделирования были использованы приведенные в [6] данные (в относительных единицах) для типичной современной высоконагруженной системы энергоснабжения:

Синхронный генератор
 $X_d = 1,6500; X_q = 1,5900; X_{akd} = 1,5100;$
 $X_{akq} = 1,4500; X_{kkd} = 1,6420; X_{kkq} = 1,5238;$
 $X_{ffd} = 1,6286; X_{afd} = 1,5100; X_{fkd} = 1,5100; r_a = 0,0045; r_{fd} = 0,00096; r_{kd} = 0,0160; r_{kq} = 0,0116;$

Сеть передачи
 $X_t = 0,1200; X_{l1} = 0,4800; X_b = 0,1800; R_b = 0,0084; R_t = 0,0012; R_{l1} = 0,0444; R_{l2} = 0,0402; X_{l2} = 0,4434;$

Механическая система
 $M_3 = 1,7581; D_3 = 0,1758; K_{23} = 83,3823; K_{34} = 3,7363;$



Системы регулирования напряжения/мощности

$$K_r = 2; T_r = 0,01; T_w = 1; K_s = 0,2; T_l = 0,05; \\ T_2 = 0,02.$$

В процессе моделирования динамического поведения такой системы в первую очередь изучалось влияние параметра компенсации μ на характер переходных процессов. Для этого были проведены расчеты динамического поведения системы при различных значениях означенного параметра.

Результаты этих расчетов приведены на рис. 5–7 (как сами переходные процессы в ис-

следуемой электроэнергетической системе по некоторым фазовым координатам, так и графики спектральной плотности фазного тока). Графики спектральных плотностей иллюстрируют процесс нарастания хаотичности колебаний в системе по мере изменения параметра μ .

Результаты

Причины описанного в предыдущем разделе эффекта иллюстрирует рис. 8, на котором приведен график эволюции вещественной части максимального собственного значения линеаризо-

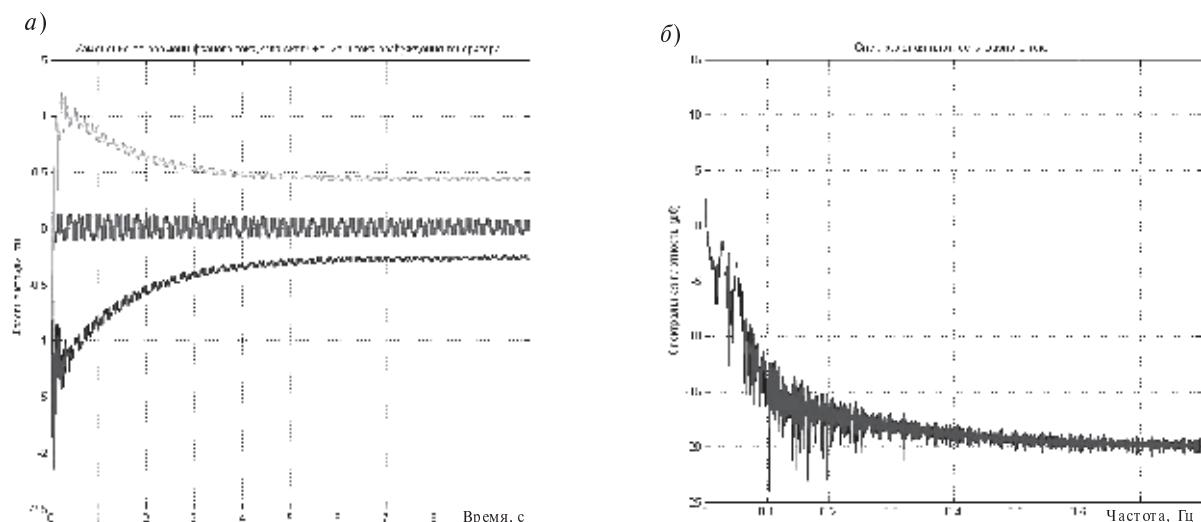


Рис. 5. Переходный процесс по фазному току, углу скольжения генератора и току возбуждения (а), а также спектральная плотность фазного тока (б) при $\mu = 0,25$

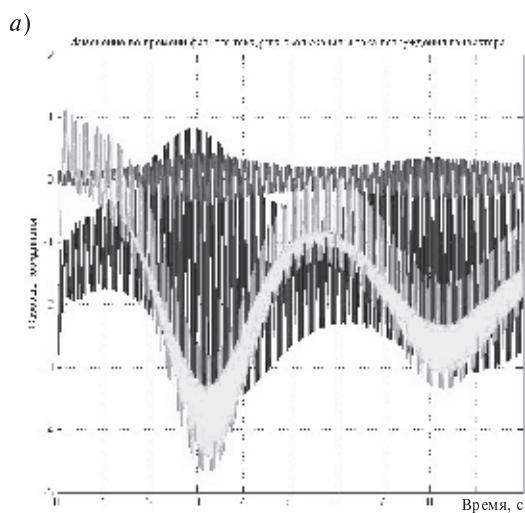


Рис. 6. Переходный процесс по фазному току, углу скольжения генератора и току возбуждения (а), а также спектральная плотность фазного тока (б) при $\mu = 0,75$

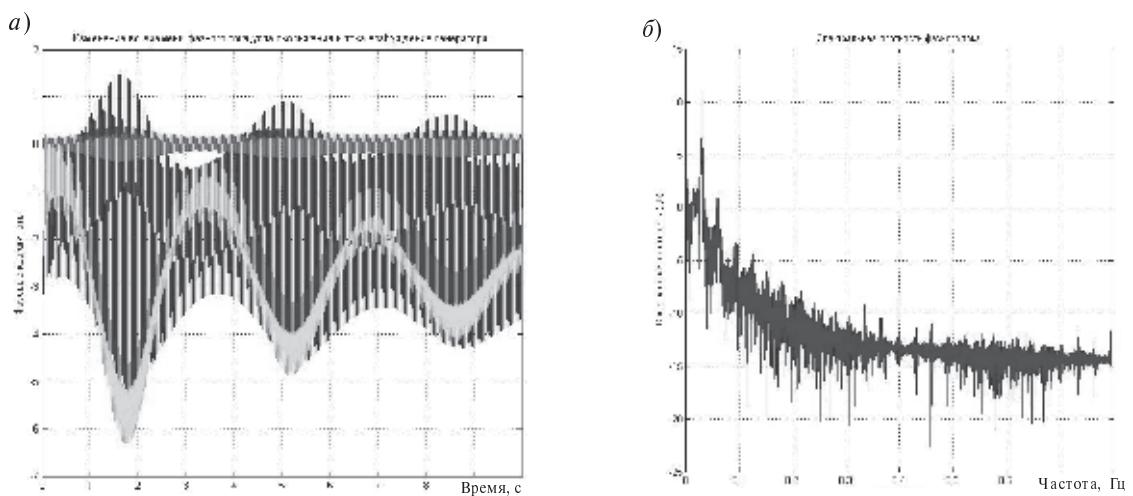


Рис. 7. Переходный процесс по фазному току, углу скольжения генератора и току возбуждения (а), а также спектральная плотность фазного тока (б) при $\mu = 0,95$

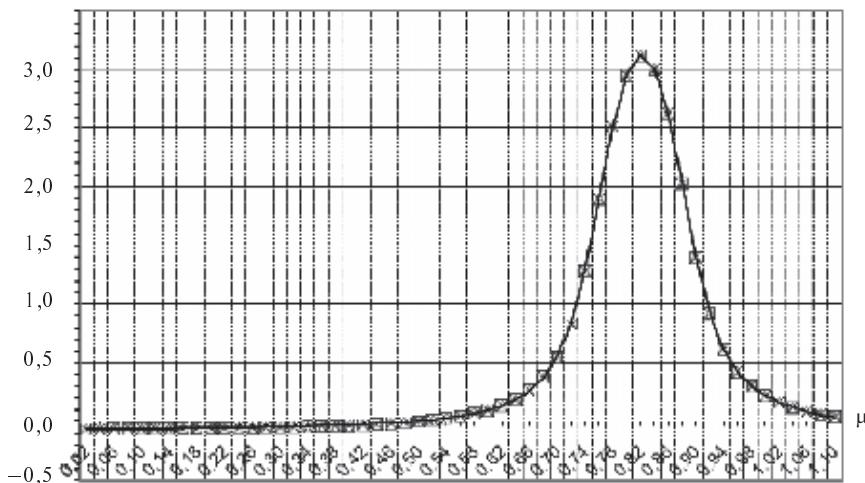


Рис. 8. Эволюция вещественной части максимального собственного значения линеаризованной ЭЭС вблизи соответствующей стационарной точки
 $(\text{---} \square \text{---} T_m = 0,9; \text{---} \triangle \text{---} T_m = 1,0; \text{---} \times \text{---} T_m = 1,1)$

ванной модели ЭЭС при изменении параметра μ в пределах от 0,2 до 1,2. Видно, что при $\mu \approx 0,55 - 0,65$ вещественная часть становится положительной (имеет место бифуркация Андронова—Хопфа), быстро растет и после достижения максимума в интервале $\mu = 0,82 - 0,86$ снижается до отрицательных значений. Этот эффект и определяет возникновение хаотичности в поведении системы. Зависимость величины максимально-го собственного значения от других параметров, определяющих поведение системы (например, подведенной к генератору мощности T_m), незначительна. На рис. 8 приведены графики, харак-

теризующие эволюцию собственных значений линеаризованной модели ЭЭС при изменении T_m в пределах от 0,9 до 1,1. Различить их практически невозможно ввиду их близости.

В работе [13] приведена теорема Хопфа, применимая к автономной системе дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{dt} = F(x, \mu), \quad (13)$$

зависящей от действительного параметра μ . Предполагается, что (13) допускает аналитическое семейство $x = x(\mu)$ состояний равновесия,



т. е. $F(x(\mu), \mu) = 0$. Без ограничения общности можно считать, что этим семейством является $x \equiv 0$, т. е. $F(0, \mu) = 0$. Допустим, что при некотором μ , например при $\mu = 0$, матрица $F_x(0, \mu)$ имеет два чисто мнимых собственных значения $\pm i\beta$ и не существует других собственных значений $F_x(0, \mu)$, целочисленно кратных $i\beta$. Пусть $\alpha(\mu) + i\beta(\mu)$ является продолжением по параметру собственного значения $i\beta$. Будем дополнитель но предполагать, что $\alpha'(0) \neq 0$.

Теорема Хопфа. При сформулированных условиях существуют непрерывные функции $\mu = \mu(\varepsilon)$ и $T = T(\varepsilon)$, зависящие от параметров ε , $\mu(0) = 0$, $T(0) = 2\pi\beta^{-1}$, такие, что уравнения (13) существуют периодические решения $x(t, \varepsilon)$ с периодом $T(\varepsilon)$, которые «влипают» в начало координат при $\varepsilon \rightarrow 0$.

На рис. 9 приведена схема бифуркации Андронова—Хопфа при переходе критического параметра (в работе это μ) через точку бифуркации, меняющую качественное поведение траекторий системы.

Приведенные в настоящей статье результаты свидетельствуют о том, что в современных распределенных ЭЭС могут возникать хаотические режимы при определенных значениях параметров подсистем. Вопросы предотвращения этих явлений, отмеченных еще с начала 70-х годов цепочкой аварий, возникших в сильно нагруженных энергосетях западного и восточно го побережья США, становятся все более актуальными. Это определяется ростом сложности и нагрузки эксплуатируемых ЭЭС, а также прогрессирующими износом оборудования, применяемого при передаче, распределении и регулировании электрической энергии.

Для устранения на этапе разработки подобных катастрофических ситуаций могут применяться различные методы:

конструктивный, требующий изменения конструкции ЭЭС с вводом тех или иных компенсирующих устройств;

пассивный, состоящий в отключении части сегментов системы передачи до стабилизации процессов в ЭЭС;

активный, предполагающий расширение зоны работоспособности энергосистемы путем организации диагностики процессов, происходящих в ней, и при необходимости — управле-

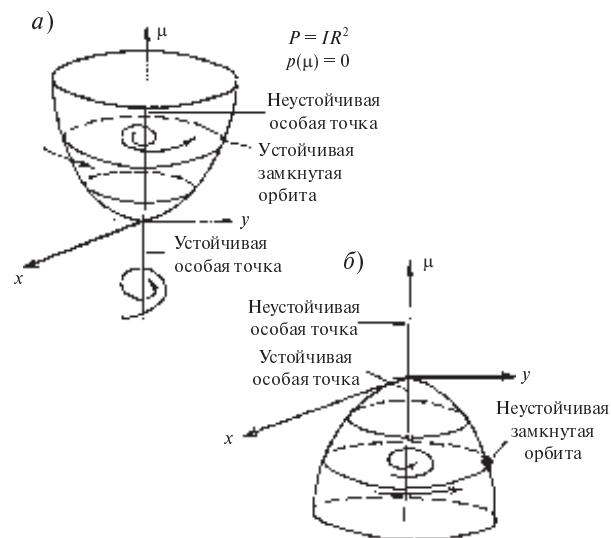


Рис. 9. Качественная картина траекторий при наступлении бифуркации Андронова—Хопфа: а — суперкритическая бифуркация (устойчивые замкнутые орбиты); б — субкритическая бифуркация (неустойчивые замкнутые орбиты)

ние теми или иными внутренними процессами генерации энергии, которые оказывают влияние на общие свойства ЭЭС как динамической системы.

При различных методах необходимы исследования систем энергоснабжения с выявлением наиболее уязвимых факторов, создание механизмов диагностики ранних предпосылок к авариям. Рост потребления энергии, износ оборудования и усложнение топологии сети передачи обусловливают чрезвычайную уязвимость ЭЭС к внешним возмущениям.

Рекомендации

В настоящее время опыта организации управления динамическими системами, функционирующими в режимах на грани хаотичности, недостаточно для разработки системы предупреждения аварий. Обеспечение безаварийной работы ЭЭС усложняется с ростом количества элементов сети, топологии и увеличением нагрузки электроэнергетических систем.

Направления исследования, которые должны оказать существенное влияние на получение опыта в работе с системами такого уровня сложности, — это в первую очередь работы по выявлению наиболее критичных параметров,

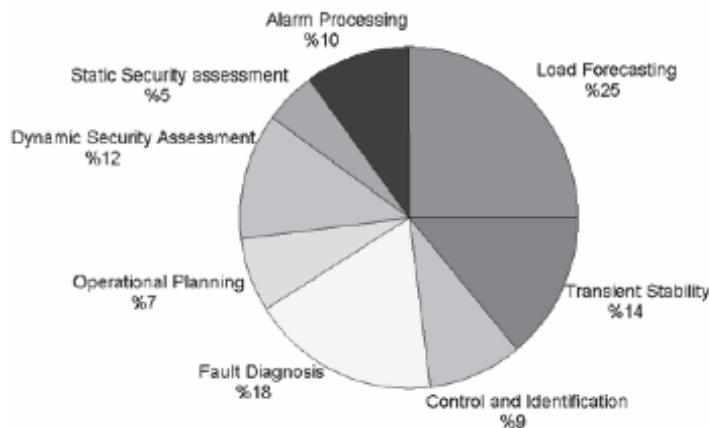


Рис. 10. Применение нейронных сетей в энергетике
(2000 — апрель 2005 года)

к которым система в максимальной степени чувствительна. Инструментом для подобных исследований должна стать теория чувствительности, развитая российскими учеными [14]. В результате этих работ должна быть определена иерархия параметров системы (от наиболее к наименее критичным). Работы [20, 21] свидетельствуют о наличии в наши дни интереса к оптимизации структуры систем передачи энергии с использованием методов, сходных с теми, которые предлагались авторами [14] еще в начале семидесятых годов.

Другое направление исследований — диагностика режима и выявление хаотичности на ранних этапах развития неустойчивости, пока автоматика еще не начала разрушать цельную систему энергоснабжения, стабилизируя ее работу. В этом направлении ведутся работы и за рубежом, причем используются методы теории искусственных нейронных сетей. Примерами таких работ являются [15, 18, 19].

В обзоре [19] приведена диаграмма, изображенная на рис. 10, из которой следует, что наибольшее число работ связано с планированием нагрузки (25 %), но при этом 14 % работ посвящено борьбе с кратковременными возмущениями в системах электроснабжения и еще 12 % — обеспечению динамической устойчивости, т. е. тому, о чем идет речь в настоящей статье.

Нельзя оставить без внимания и методы управления хаотическими режимами путем реализации, например, метода OGY [16] или Пираса [17]. Они используют то обстоятельство, что хаотический режим чрезвычайно чувствителен к параметрам системы и существует зачастую в очень узких областях таких параметров. Любые изменения системы, обусловленные технологической или экономической необходимостью подключения дополнительных потребителей (что типично для энергетических систем) или особенностями системы регулирования могут предотвратить колебательные режимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины [Текст] / А.А. Горев.— Л.-М.: Государственное издательство энергетической литературы, 1950.
2. Козлов, В.Н. Управление энергетическими системами. Ч.6. Обобщенные модели энергетических объединений [Текст] / В.Н. Козлов.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008.
3. Леонов, Г.А. Нелокальный анализ дифференциальных уравнений асинхронной машины [Текст] / Г.А. Леонов, Н.В. Кондратьев, Ф.Ф. Родюков, А.И. Шепелявый // В сб.: Нелинейная механика / Под ред. В.М. Матросова, В.В. Румянцева, А.В. Карапетяна.— М.: Физматлит, 2001.
4. Родюков, Ф.Ф. Математическая модель большой электроэнергетической системы [Текст] / Ф.Ф. Родюков.— СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2006.
5. Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies [Текст] // IEEE Power Engineering Society.— 2005.
6. Anderson, P.M. Subsynchronous Resonance in Power Systems [Текст] / Paul M. Anderson,



B.L. Agrawal, J.E.Jan Ness.— Wiley-IEEE Press.— January 1999.

7. Harb, A.M. Modern nonlinear Theory As applied to SSR of the IEEE second Benchmark Model [Текст] / A.M. Harb, M.S, Widyan // Bologna PowerTech Conference.— Bologna.— Italy. 2003.

8. Козлов, В.Н. Управление энергетическими системами. Ч.2. Электромеханические процессы [Текст] / В.Н. Козлов.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006.

9. Александров, Г.Н. Передача электрической энергии переменным током [Текст] / Г.Н. Александров.— М.: Изд-во «Знак», 1998.— 278 с.

10. Веников, В.А. Дальние передачи переменного и постоянного тока [Текст] / В.А. Веников, Ю.П. Рыжов.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 276 с.

11. Евдокунин, Г.А. Исследование статической устойчивости дальних линий электропередач с управляемыми шунтирующими реакторами [Текст] / Г.А. Евдокунин, А.А. Рагозин.— Электричество. 1996. № 8.

12. Александров, Г.Н. Управляемые реакторы [Текст]: Учебное пособие / Г.Н. Александров, В.П. Лунин / Центр подготовки кадров энергетики.— СПб., 2005.

13. Marsden, J.E. The Hopf Bifurcation and its applications [Текст] / J.E. Marsden, M. McCracken.— NEW YORK: SPRINGER-VERLAG. 1976.

14. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении [Текст] / Под ред. Е.Н. Рот

зенвассера и Р.М. Юсупова.— Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1971.

15. Elango, M.K. Application of Neural Networks for Power Quality Disturbance Classification Using Hilbert Huang Transform [Текст] / M. K. Elango, A. Nirmal Kumir, S. Purushothman // European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X.— 2010. Vol. 47, № 3.— P. 442–454.

16. Ott, E. Controlling chaos [Текст] / E. Ott, C. Grebogi, J. Yorke // Phys. Lett.— 1990. Vol. 64. P. 1196–1199.

17. Pyragas, K. Control of chaos via an unstable delayed feedback controller [Текст] / K. Pyragas // Phys. Rev. Lett. A.— 2001. Vol. 86.— P. 265–2268.

18. Handbook of neural network signal processing / Ed., Yu Hen Hu, Jenq-Neng Hwang., Boca Raton.— London, New York, Washington.— D. C. 2002.

19. Tarafdar Haque, M. Application of Neural Networks in Power Systems [Текст] / M. Tarafdar Haque, A.M. Kashtiban // A Review. World Academy of Science, Engineering and Technology.— 2005.— № 6.

20. Voltage Control in Smart Grids: An Approach Based on Sensitivity Theory [Текст] / Jorn. Electromagnetic Analysis & Applications.— 2010.— № 2.— P. 467–474

21. Petkovski, D. Suboptimal Performance Criterion Sensitivity of Large-Scale Decentralized Control Systems / Djordjija Petkovski // Kybernetika.— 1986. Vol. 22. № 6.

УДК 621.438

К.Д. Андреев, Н.А. Забелин, В.А. Рассохин

ВЫБОР ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТИПА НК-16СТ

В статье рассматривается возможность создания паротурбинной установки (ПТУ), работающей в составе комбинированной парогазовой установки типа ПГУ-20 на базе газотурбинного двигателя НК-16СТ и использующей генерируемый в котле-утилизаторе пар [1]. Традиционно такие проблемы решаются при использовании в качестве ПТУ многоступенчатых турбин соответственной мощности [2]. Однако такие ПТУ имеют большое количество турбинных ступеней, значительные массогабаритные показатели при относительно невысокой экономичности и слож-

ную технологию изготовления лопаточных аппаратов проточной части.

В нашей работе предлагаются решения по созданию проточных частей ПТУ, основанные на опыте разработок сверхзвуковых турбинных ступеней, которые исследовались в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбГПУ) под руководством доктора технических наук профессора В.А. Рассохина и Инновационной научно-технической фирме «Турботехника», созданной при СПбГПУ для решения подобных задач. Применение та-

ких ступеней позволяет существенно улучшить массогабаритные показатели ПТУ без заметного снижения экономичности. Вместе с тем некоторые технологические ограничения, определяемые заводом-изготовителем, не позволяют оптимально решить задачу максимальной экономичности. К таким ограничениям прежде всего относятся:

невозможность изготовления радиально-осевых ступеней;

сложности производства сопловых и рабочих лопаток с изменяющейся геометрией по высоте и замками крепления лопаток на ободе диска;

требование расширения размеров межлопаточных каналов сопловых аппаратов (СА), направляющих аппаратов (НА) и решеток рабочих колес (РК), выполняемых методом фрезерования.

Несмотря на поставленные ограничения, в предлагаемой работе удалось найти оптимальные технические решения для ПТУ-5ТТ в составе указанной комбинированной установки.

Выбор кинематической схемы паровой турбины ПТ-5ТТ

Один из основных этапов проектирования новой паротурбинной установки — выбор кинематической схемы проточной части турбины, влияющей как на эффективность ПТУ, так и на ее массогабаритные параметры. В определенной

степени выбор кинематической схемы зависит и от технологической оснащенности производства. На этапе подготовки технического предложения был проработан ряд возможных вариантов кинематических схем проточной части ПТУ, представленных ниже:

вариант 1 — однопоточная турбина с радиально-осевой и двумя осевыми ступенями;

вариант 2 — двухпоточная турбина с радиально-осевой и двумя осевыми ступенями по одному потоку;

вариант 3 — двухпоточная осевая турбина с двумя ступенями по одному потоку;

вариант 4 — двухпоточная центро斯特ремительная турбина с двумя ступенями по одному потоку (рис. 1);

вариант 5 — двухпоточная турбина с первой центро斯特ремительной и осевыми ступенями по одному потоку (рис. 2).

Газодинамические расчеты представленных вариантов показали, что наибольшей эффективностью обладает турбина с проточной частью по варианту 2. Остальные варианты, обладая также достаточно высокой эффективностью, имеют преимущества как в конструктивном, так и в технологическом плане. На основании анализа кинематических схем к рассмотрению и дальнейшему детальному анализу были приняты варианты 4 и 5 (см. рис. 1 и 2).

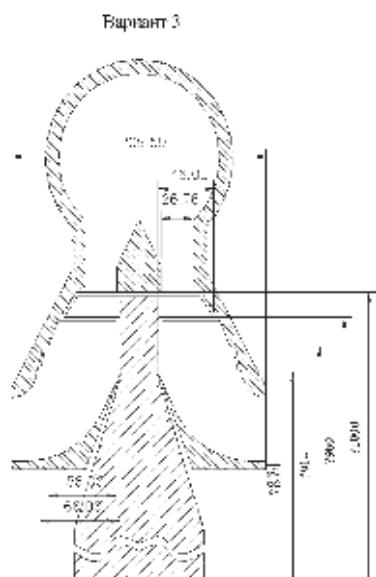


Рис. 1. Двухпоточная центро斯特ремительная турбина с двумя ступенями по одному потоку

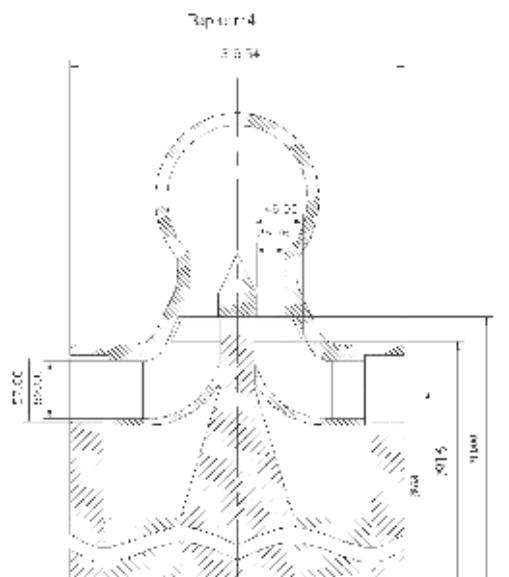


Рис. 2. Двухпоточная турбина с первой центро斯特ремительной и второй осевой ступенями по одному потоку



Газодинамические расчеты и определение внутренних КПД и мощности двух вариантов паровой турбины ПТУ-5ТТ

Выбор основных геометрических характеристик ступеней паровой турбины: диаметральных и осевых размеров, частоты вращения, числа ступеней с учетом прочностных ограничений.

ПТУ-5ТТ-3/1 — вариант 4, проектировался на частоту вращения вала 6000 об/мин. Частота вращения вала, периферийный диаметр и ширина рабочих лопаток колеса выбраны по результатам прочностных расчетов предельно высокими, но такими, чтобы обеспечить требуемый запас прочности. Максимальный диаметр для рабочего колеса близок к предельному значению, допускаемому технологическим оборудованием завода-изготовителя и необходим для увеличения проходных сечений, особенно на выходе из турбины.

Проточная часть состоит из двух радиальных центростремительных ступеней. В первой ступени использован лопаточный аппарат конструкции ЛПИ для высоконагруженных малорасходных сверхзвуковых турбин с малыми углами потока. Горловые сечения рабочих решеток выбраны с учетом технологических требований.

Первая радиальная ступень выполнена высоконагруженной: с углом выхода потока из ступени, заметно отличающимся от радиального направления. Это позволило выработать в первой ступени максимальную мощность. Вторая ступень спроектирована для использования большой кинетической энергии, выходящей из первой ступени. Для этого направляющие лопатки второй ступени имеют входной угол, подстроенный под угол выхода из первой ступени. Уменьшение окружной скорости вместе с радиусом уменьшает работоспособность второй и возможных последующих ступеней. Кроме того, длина последней лопатки не может быть увеличена из-за прочностных ограничений. Таким образом, от попытки использовать три радиальные ступени из-за прочностных ограничений пришлось отказаться.

ПТУ-5ТТ-4/1 — вариант 5. Проточная часть состоит из радиальной центростремительной ступени и двух осевых ступеней обычного типа (см. рис. 2). В первой ступени использован лопаточный аппарат, разработанный в ЛПИ для высоконагруженных малорасходных сверхзвуковых турбин с малыми углами потока. Периферийный

диаметр и ширина рабочего колеса выбраны по результатам прочностных расчетов, чтобы обеспечить требуемый запас прочности. Вариант проектировался на повышенную частоту вращения вала 9000 об/мин, поскольку на диске рабочего колеса имеется только один ряд рабочих лопаток. Горловые сечения рабочих решеток выбраны с учетом технологических требований.

Геометрические характеристики осевых ступеней выбирались на базе проектировочных расчетов с учетом прочностных и технологических ограничений. Требовалось выполнить лопатки всех ступеней незакрученными, поэтому введено ограничение на коэффициент веерности последней ступени $(d/h)_2 > 8-10$. Наилучшее согласование проточной части радиальной ступени с двумя осевыми, обеспечивающее наибольший КПД при выполнении всех ограничений, достигнуто на ступенях с оптимально подобранный геометрией.

Профилирование сопловых аппаратов и рабочих колес ПТУ-5ТТ-3/1 и ПТУ-5ТТ-4/1. Эффективность проточных частей турбоустановок целиком и полностью определяется квалифицированным профилированием сопловых и рабочих лопаток. Применение традиционных методов расчета и построения проточных частей зачастую приводит к значительному возрастанию числа ступеней и увеличению массы и габаритов установки. Использование опыта, накопленного в СПбГПУ (ЛПИ) под руководством профессоров И.И. Кириллова и В.А. Рассохина, позволяет создавать эффективные высоконагруженные турбинные ступени, в значительной степени уменьшающие массогабаритные характеристики при высоких значениях КПД.

В процессе профилирования как сопловых, так и рабочих лопаток первых высоконагруженных ступеней использованы расчетные и графические пакеты программ, разработанные на кафедре «Турбиностроение» СПбГПУ. При проектировании лопаток последних ступеней применяются современные методы профилирования, разработанные в других организациях. Профили лопаток сопловых аппаратов и рабочих колес представлены на рис. 3, 4.

Описание проточных частей вариантов турбин ПТУ-5ТТ-3/1 и ПТУ-5ТТ-4/1

ПТУ-5ТТ-3/1. Радиальная центростремительная двухступенчатая проточная часть представлена на рис. 5. Особенностью проточной

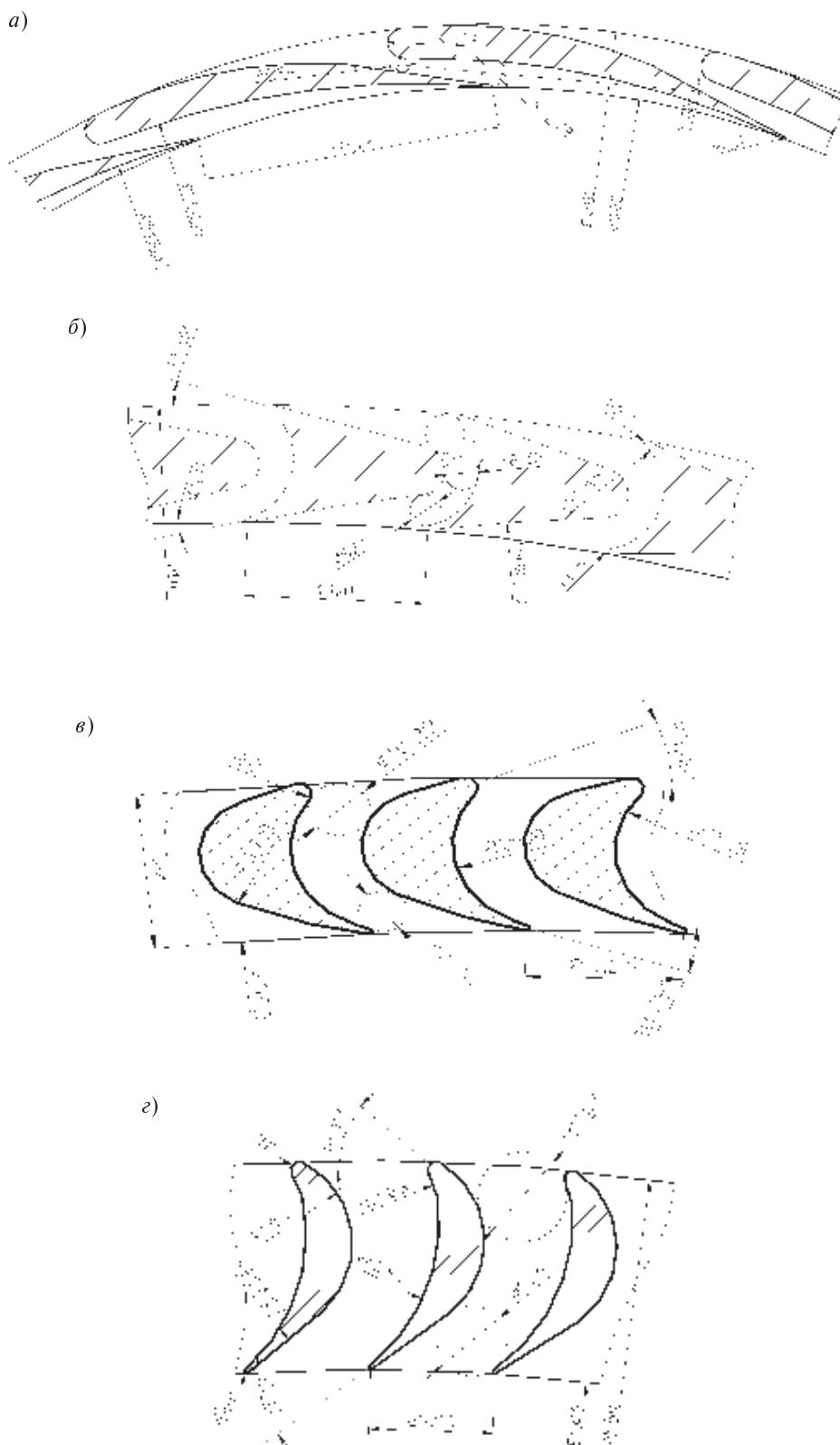


Рис. 3. Сопловой аппарат (а) и рабочее колесо (б) 1-й ступени
и сопловый аппарат (в) и рабочее колесо (г) 2-й ступени ПТУ-5ТТ-3/1

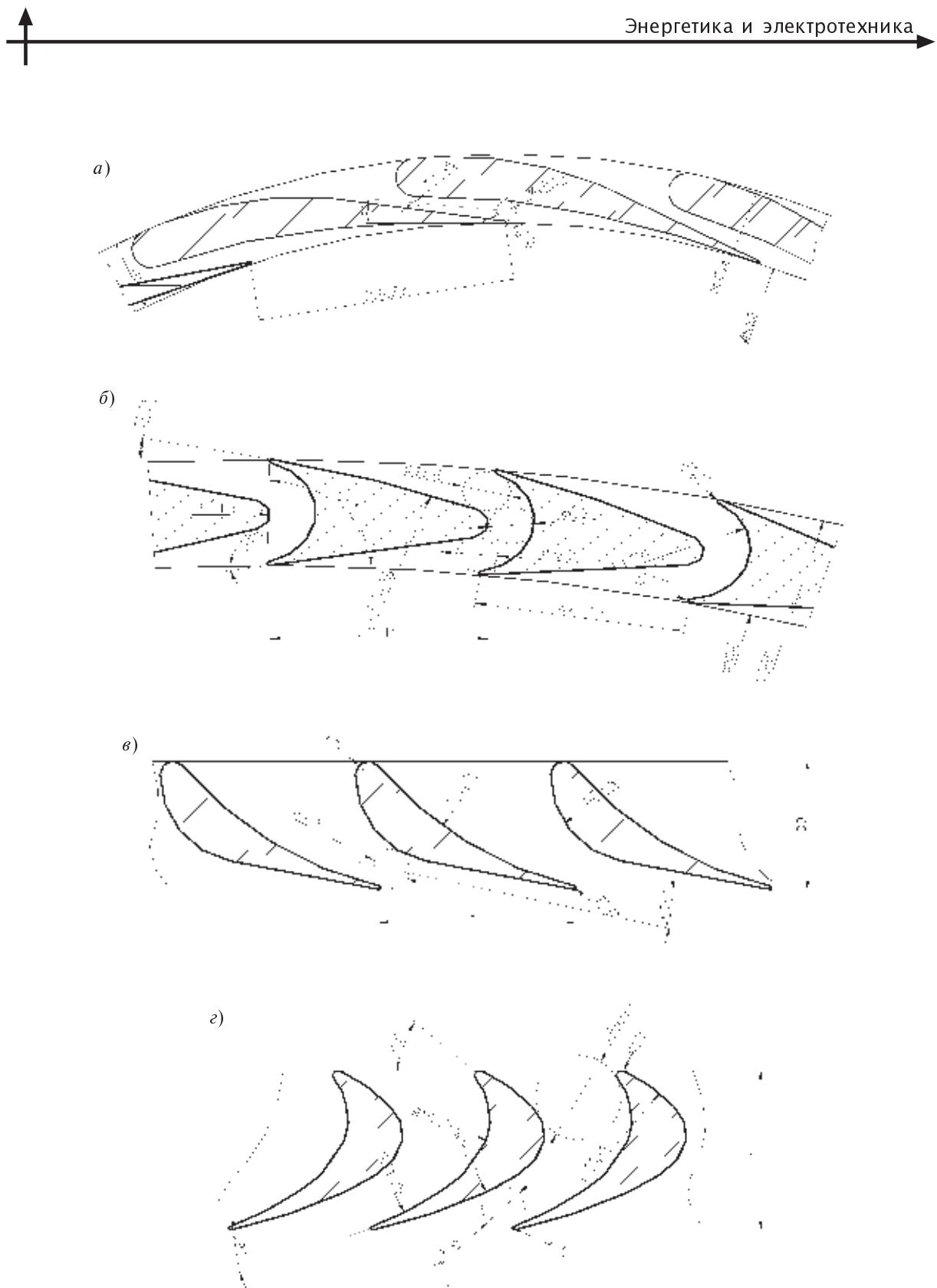


Рис. 4. Сопловые аппараты 1-й (а), 2-й (в), 3-й (д) ступеней и рабочие колеса 1-й (б), 2-й (г), 3-й (е) ступеней ПТУ-5ТТ-4/1

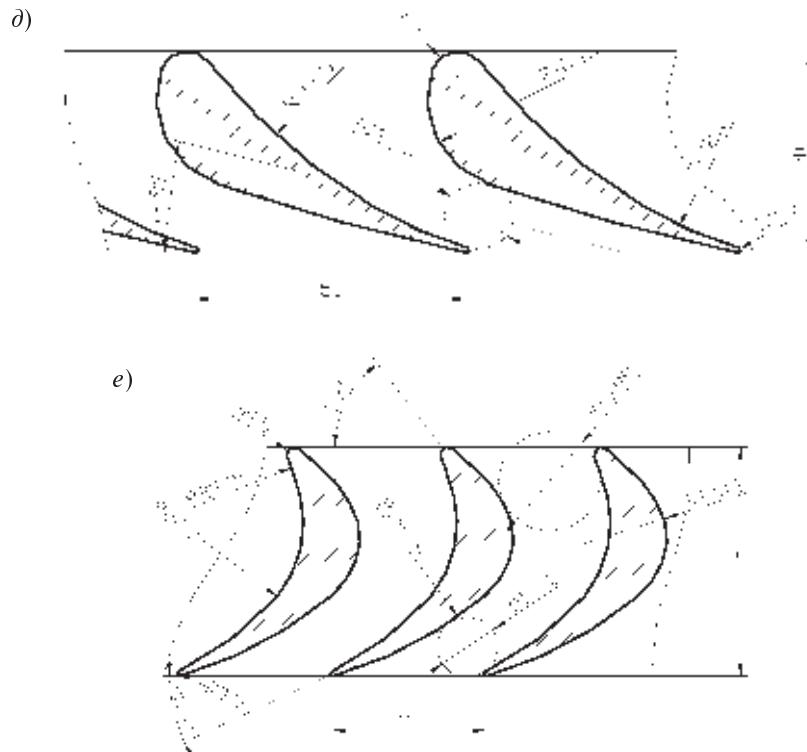


Рис. 4. (Окончание)

части данного варианта является выполнение рабочих лопаток заодно с диском рабочего колеса путем фрезерования по ободу в осевом направлении. Фрезерование лопаток сопловых аппаратов осуществляется аналогичным образом по ободу кольцевых диафрагм.

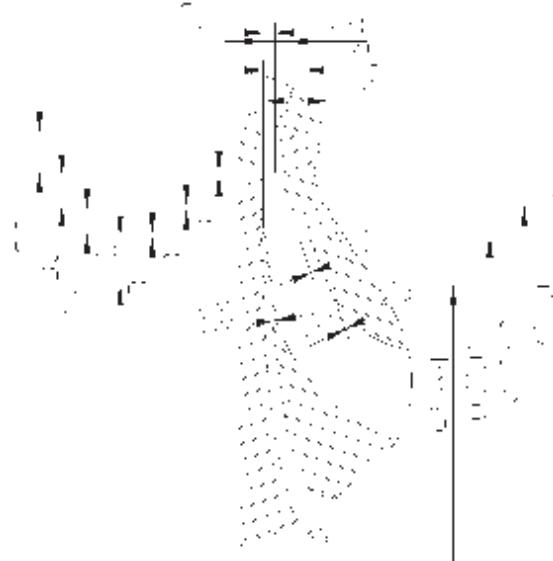


Рис. 5. Проточная часть ПТУ-5ТТ-3/1

ПТУ-5ТТ-4/1 — двухпоточная турбина с центростремительной и двумя осевыми ступенями. Проточная часть турбины представлена на рис. 6. Особенностью проточной части данного варианта является выполнение рабочих лопаток заодно с дисками рабочих колес путем фрезерования по ободу. Для центростремительной ступени фрезерование осуществляется аналогично предыдущему варианту. Фрезерование лопаток осевых ступеней производится в радиальном направлении как для сопловых аппаратов, так и для рабочих колес.

Определение внутренних КПД и мощности паровой турбины. Параметры пара выбраны после оптимизационных расчетов тепловой схемы для всех вариантов одинаковыми: $P_0^* = 17,5$ бар; $t_0^* = 360^\circ\text{C}$ с давлением в конденсаторе $P_2 = 0,125$ бар. Это сочетание параметров обеспечивает требуемую мощность установки при минимальной допустимой степени влажности на входе в конденсатор. Из расчета тепловой схемы расход пара должен быть $G = 8,59$ кг/с (на поток 4,295 кг/с).

Внутренние КПД и мощности вариантов паровой турбины определялись детальными га-



зодинамическими расчетами в контрольных сечениях проточной части с нахождением всех составляющих потерь мощности, включая внутренние протечки рабочего тела, по полу-эмпирическим зависимостям. Давление торможения на первых ступенях всех вариантов уменьшено на величину потерь в системе парораспределения.

ПТУ-5ТТ-3/1 – вариант 4. Проектирование радиальной высоконагруженной ступени велось методом вариантных расчетов в рамках прямой задачи (проверочные расчеты ступеней с заданной геометрией) с помощью программы определения параметров потока и характеристик сверхзвуковой ступени, в которой используются зависимости для потерь энергии в ступенях данного типа. Коэффициенты скоростей в направляющих и рабочих лопатках ступеней вычислялись по зависимостям, обобщившим экспериментальные данные в профилях данного типа. Отклонения от оптимальной геометрии и высокие сверхзвуковые скорости потока привели к высокому уровню потерь в проточной части и низкому значению КПД — $\eta_b = 0,633$.

Уменьшение окружной скорости вместе с радиусом привело к значению характеристического числа второй ступени меньше желаемого (оптимального). Это обстоятельство не дало возможности обеспечить в данном варианте полностью радиальный выход потока из проточной

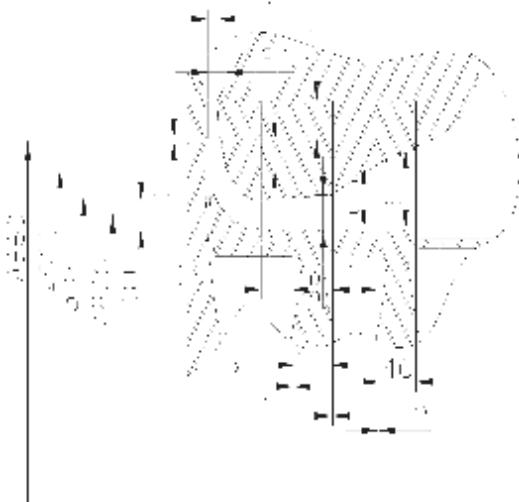


Рис. 6. Проточная часть ПТУ-5ТТ-4/1

части. Кроме того, длина последней лопатки не может быть увеличена из-за прочностных ограничений. Все перечисленные факторы не позволили поднять внутренний КПД второй радиальной ступени выше 63,9 %. Результаты расчетов параметров потока пара в сечениях межвенцовых зазоров по ступеням ПТУ-5ТТ-3/1 (вариант 4) представлены в табл. 1. Суммарная мощность всех ступеней составляет 2677,5 кВт на поток, или 5355 кВт на всю турбину, что с учетом потерь в клапанах соответствует мощностному КПД проточной части 69,4 %.

Таблица 1

Результаты газодинамического расчета ПТУ-5ТТ-3/1 (вариант 3) в расчете на один поток

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра	
		для 1-й ступени	для 2-й ступени
Температура торможения на входе в ступень, t_0^*	°C	360	140,1
Давление торможения на входе в ступень, P_0^*	бар	17,15	0,90748
Расход пара через СА, G_{CA}	кг/с	4,295	4,2
Давление на выходе из Н.Л, P_1	бар	0,7014	0,17944
Температура на выходе из Н.Л, t_1	°C	100,1	57,8
Число Маха на абсолютной теоретической скорости в СА, M_{elt}	—	2,655	1,499
Скорость на Н.Л, C_1	м/с	1019,4	645,5
Коэффициент скорости в СА, φ_{CA}	—	0,894	0,899
Угол истечения СА, α_1	град.	14,3	21,92
Опосительная скорость на СА, W_1	м/с	707	645,5
Угол потока на входе в РК, β_1	град.	20,83	39,6
Число Маха от относительной скорости на входе в РК, M_{w1}	—	1,851	0,876

Окончание табл. 1

Наименование параметра	Размерность	Значение параметра	
		для 1-й ступени	для 2-й ступени
Число Маха потока на выходе из РК, M_{w2t}	—	1,646	1,047
Коэффициент скорости в Р.1, γ_1	—	0,92	0,9266
Температура торможения в ступенях, вытекающих из РК, t_{tw2}^*	°C	225	112,8
Давление на ступени, P_2	бар	0,600	0,125
Температура на ступени, t_2	°C	102,4	50,3
Число Маха на ступени, M_{f2}	—	0,912	0,657
Окружная скорость в РК, u_2	м/с	326,7	277,7
Скорость потока на ступени, C_2	м/с	388	265,6
Угол выхода потока из ступени, α_2^*	град.	22,72	72,4
Скорость потока в ступенях, вытекающих из РК, W_2	м/с	700	438,6
Угол потока на выходе из РК, β_2^*	град.	12,35	35,25
Термодинамическая степень реактивности ступени, ρ_1	—	0,056	0,15
Характеристическое число, u_2/C_0	—	0,280	0,336
Окружной КПД ступени, η_1	—	0,636	0,681
Нагревший КПД ступени, η_1'	—	0,633	0,639
Нагревшая мощность ступени, $N_{\text{наг}}$	кВт	1844	833,5

ПТУ-5ТТ-4/1 — вариант 5. Перепад давлений на первую радиальную ступень выбирался таким образом, чтобы обеспечить выход потока, близкий к радиальному направлению. Сочетание высоких значений частоты вращения вала и диаметра рабочего колеса делает первую радиальную ступень высоконагруженной со сверхзвуковым течением за сопловым аппаратом. Проектирование радиальной высоконагруженной ступени велось методом вариантовых расчетов в рамках проверочных расчетов ступеней с заданной геометрией. Для этих целей обратились к программе расчета параметров потока и характеристик сверхзвуковой ступени, в которой используются зависимости для потерь энергии в ступенях данного типа. Отклонения от оптимальной геометрии, вызванные прочностными и технологическими ограничениями, привели к высокому уровню потерь в проточной части и значению КПД ступени, равному $\eta_{\text{в}} = 0,692$.

Коэффициенты скоростей в направляющих и рабочих лопатках осевых ступеней вычислялись по зависимостям, обобщившим экспериментальные данные в профилях данного типа. Гидравлические потери при течении в переходном диффузоре между радиальной и осевыми

ступенями учтены за счет уменьшения давления торможения перед первой осевой ступенью. Распределение перепадов и выбранные значения степеней реактивности обеспечили углы выхода потока из осевых ступеней, близкие к 90° . Результаты расчетов параметров потока пара в средних сечениях межвенцовых зазоров по ступеням ПТУ-5ТТ-4/1 (вариант 5) представлены в табл. 2.

Суммарная мощность всех ступеней на поток составляет 2991,8 кВт, или 5983,6 кВт на всю турбину ПТУ-5ТТ-4/1 (вариант 5), что с учетом потерь в клапанах соответствует мощностному КПД проточной части 77,5 %.

Предварительные проработки конструкции турбин типа ПТУ-5ТТ-3/1 и ПТУ-5ТТ-4/1

Были проведены также предварительные проработки конструкций паротурбинных установок на базе вышерассмотренных проточных частей. Эскизный вариант конструкции ПТУ-5ТТ-3/1 представлен на рис. 7.

При конструктивных проработках предварительных вариантов конструкций ПТУ-5ТТ-3/1 основное внимание уделялось сокращению трудоемкости как в процессе изготовления узлов

Таблица 2
 Результаты газодинамического расчета ПТУ-5ТГ-4/1 (вариант 4)
 в расчете на один поток

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра		
		ЦИЯ радиации, ступени	ЦИЯ 1-й осев. ступени	ЦИЯ 2-й осев. ступени
Температура горючесмеси на входе в ступени, t_0^*	°C	360	178,9	88,2
Давление горючесмеси на входе в ступени, P_0^*	бар	17,15	0,9	0,666
Расход газа через СА, $G_{r,1}$	кг/с	4,295	4,17	4,2
Давление на выходе из Н.Л, P_1	бар	2,207	0,927	0,237
Температура на выходе из Н.Л, t_1	°C	176,6	113,2	63,8
Число Маха по абсолютной теоретической скорости в СА, M_{elt}	—	1,981	1,065	1,244
Скорость на Н.Л, C_1	м/с	865,6	512,6	522,2
Корректируемая скорость в СА, $\varphi_{r,1}$	—	0,894	0,945	0,942
Угол потока на СА, α_1	град.	6,62	11,89	15,76
Относительная скорость в СА, W_1	м/с	447	165	177,3
Угол потока на входе в РК, β_1	град.	12,9	40,82	53,03
Число Маха по относительной скорости на входе в РК, M_{w1}	—	1,023	0,343	0,557
Число Маха по относительной теоретической скорости на выходе из РК, M_{w2}	—	0,998	0,819	1,102
Корректируемая скорость в Р.Л, v	—	0,835	0,949	0,948
Температура горючесмеси в относительном движении в РК, t_{rw2}^*	°C	222,6	120,3	112,3
Давление на ступени, P_2	бар	2,0	0,636	0,125
Температура на ступени, t_2	°C	177,8	85,5	49,5
Число Маха на ступени, M_{r2}	—	0,165	0,267	0,476
Отсекаемая скорость на РК, u_2	м/с	424,1	382,2	402,9
Скорость потока на ступени, C_2	м/с	70	124,6	186,2
Угол выхода потока из ступени, α_2^*	град.	95	102,2	93,9
Скорость потока в относительном движении в РК, W_2	м/с	423	378,9	431,1
Угол потока на выходе из РК, β_2^*	град.	9,5	18,89	25,47
Термодинамическая степень реактивности ступени, μ_1	—	0,058	0,3	0,35
Характеристическое число, u_2/C_0	—	0,426	0,589	0,587
Отсекаемый КПД ступени, η_1	—	0,707	0,87	0,823
Внупрережимный КПД ступени, η_1	—	0,692	0,788	0,789
Внупрережимная мощность ступени, $N_{r,1}$	кВт	1477	712,0	802,4

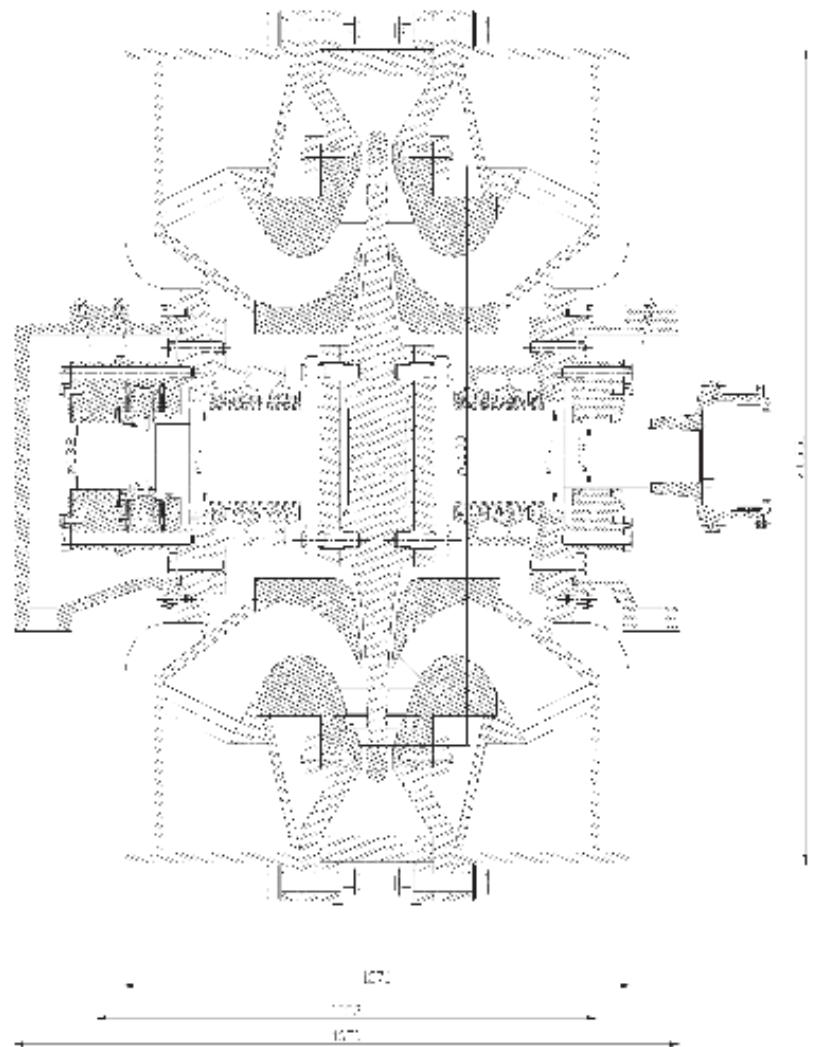


Рис. 7. Эскизный вариант продольного разреза ПТУ-5ТТ-3/1

и деталей двигателя, так и при сборке. Из соображений обеспечения высокой прочности и надежности внешних корпусов турбины их конструкция не имеет горизонтального разъема. В связи с этим сборка блока осуществляется в осевом направлении. Единственными элементами, имеющими горизонтальный разъем, в данной конструкции — лабиринтовые уплотнения.

В конструкции ПТУ-5ТТ-4/1 использованы те же принципы построения блока ПТУ-5ТТ-3/1. Однако распространение его и на сборку осевой части ПТУ-5ТТ-4/1 приводит к необходимости переборок ротора при любых разборках турбины. Поэтому аппарат поворота потока к осевым ступеням, диафрагмы осевых

ступеней и вставки над рабочими венцами выполнены с горизонтальным разъемом, что обеспечивает осевую сборку остальных элементов и отсутствие горизонтальных разъемов на внешних корпусах.

Представленные в статье различные оптимальные конструктивные решения получены на основе собственных разработок СПбГПУ (ЛПИ) по подбору паровой турбины для комбинированной установки, газовый контур которой выполнен на базе газотурбинного двигателя НК-16СТ. Они позволяют разработать комбинированную парогазовую установку с высокой экономической эффективностью.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсеньев, Л.В. Комбинированные установки с паровыми и газовыми турбинами [Текст] / Л.В. Арсеньев, В.А. Рассохин, В.А. Черников.— СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996.— 124 с.
2. Костюк, А.Г. Паровые и газовые турбины для электростанций [Текст] / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка.— М.: Изд. дом МЭИ, 2008.— 556 с.

УДК 532.5

А.Ю. Пospelов, Ю.Г. Георгиева, А.А. Жарковский

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ В ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЕ ГИДРОТУРБИНЫ ГЭС

В работе приведены результаты численного исследования течения в отсасывающей трубе гидротурбины ГЭС Платановриси. Расчет течения проводился на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса с использованием гидродинамического программного комплекса *Fluent*. С целью верификации результатов расчета проведено их сравнение с имеющимися экспериментальными данными.

Отсасывающая труба (ОТ) гидротурбины представляет собой криволинейный диффузор сложной формы. Течение в отсасывающей трубе характеризуется образованием вихревых структур, жгутов и потому довольно сложно для изучения и расчета. Перед практическим использованием расчетных методов для исследования течения в отсасывающих трубах необходимо провести их тестирование на основе имеющихся экспериментальных данных. Как показано в [1–4], результаты численного расчета зависят от многих параметров. В настоящей работе исследуется влияние на решение наиболее значимых расчетных параметров, таких, как расчетная сетка, модели турбулентности. Численное решение сравнивается с результатами экспериментальных исследований структуры потока в модели гидротурбины РО75, выполненных в ОАО ЛМЗ, где с помощью пятиточечного зонда получены распределения скорости потока в трех сечениях гидротурбины: на входе в спиральную камеру (СК), за рабочим колесом (РК) и на выходе из отсасывающей трубы. Сечения и точки, в которых проводились измерения, представлены на рис. 1 *a, б*.

Измерения проводились в режиме наибольшего КПД при расчетном напоре ($n'_t = 73,5 \text{ мин}^{-1}$; $Q'_t = 0,874 \text{ м}^3/\text{с}$).

Напор при измерениях скорости под рабочим колесом устанавливался равным 10 м, а при измерениях в выходном сечении отсасывающей трубы — 24 м. Проведение измерений во всех трех сечениях при напоре 24 м не представлялось возможным, так как из-за больших скоростей потока на выходе из колеса на шаровом зонде могли возникнуть кавитация или подсос воздуха. Полученные экспериментально скорости были пересчитаны путем приведения их величин к напору $H = 1 \text{ м}$ по формуле

$$V'_1 = V / \sqrt{H}. \quad (1)$$

Величина приведенного расхода при оптимальном КПД, полученная в результате интегрирования распределения скорости по лучу зондирования 2, равна $0,892 \text{ м}^3/\text{с}$. Приведенный расход, полученный в результате интегрирования по лучу 1, составляет $0,859 \text{ м}^3/\text{с}$. Для каждой из шести вертикалей выходного сечения (рис. 1, *б*) были получены две компоненты скорости.

Геометрическая форма ОТ построена в системе *Gambit*; в этой же системе проведено разбиение геометрии на топологические объемы с использованием «*butterfly*» топологии. Для данной топологии были построены две сетки:

исходная, грубая «*map*»-сетка, показанная на рис. 2, *a*, — гексаэдральная сетка со сгущением в области пограничного слоя. Размерность сетки — 179332 ячеек. Максимальная скосленность ячеек — 0,58, что соответствует минимальному

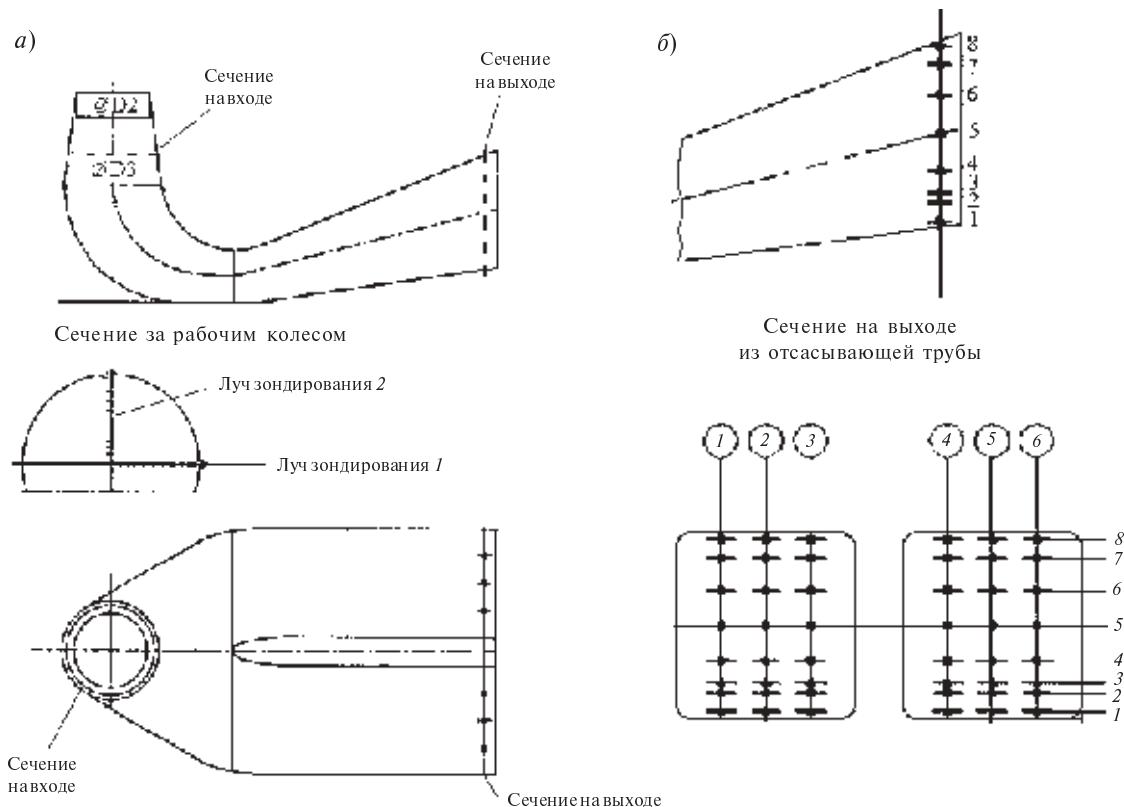


Рис. 1. Сечения, использованные для измерения скорости:
а — за рабочим колесом; *б* — выход из отсасывающей трубы

углу между гранями ячеек $37,8^\circ$. Количество ячеек со скошенностью более 0,5 (45°) — 1,94 %;

сетка «*map*» высокого разрешения. По сравнению с исходной «*map*»-сеткой количество узлов увеличено в два раза по каждому направлению. Количество ячеек — 1434656. Максимальная скошенность ячеек — 0,6. Количество ячеек со скошенностью более 0,5 составляет около 2 % от общего числа расчетных ячеек.

Для расчетной области также были построены две тетраэдральные расчетные сетки:

«*TGrid*»-сетка без выделения области пограничного слоя (рис. 2, *б*). Размер сетки — 289656 ячеек. Максимальная скошенность ячеек достигает 0,9 (менее 0,01 % от общего числа ячеек). Количество ячеек со скошенностью более 0,5 составляет 7,27 % от общего числа ячеек в расчетной области;

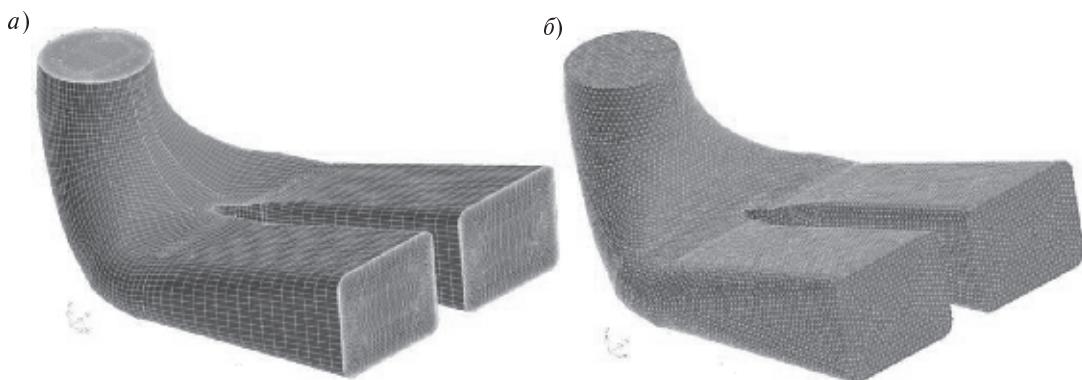


Рис. 2. Расчетные сетки: *а* — «*map*»-сетка; *б* — «*tri*»-сетка



«*TGrid*»-сетка с выделением области пограничного слоя. Для создания тетраэдальной сетки вне пристенной области использовался генератор сеток *GAMBIT*. Данная сетка совмещает два типа элементов — тетраэдальные и призматические (в пограничном слое). Размер сетки — 858655 ячеек. Максимальная скошенность ячеек — 0,85. Количество ячеек со скошенностью более 0,5 составляет 6,07 % от общего числа расчетных ячеек во всей области.

В расчете использовалось несколько моделей турбулентности: модель рейнольдсовых напряжений (*RSM*), $k - \varepsilon$ (стандартная, *RNG*, *Realizable*). Во всех случаях были использованы высокорейнольдсовые версии этих моделей. Использование низкорейнольдсовых моделей возможно, но связано с увеличением количества узлов расчетной сетки, что ведет к значительному увеличению времени расчета.

На входе в расчетную область задавались три компоненты скорости (V_z , V_r , V_{tan}), полученные экспериментально. Значения V_z снимались с одномерного графика при помощи программы *Graph2Digit*. Значения V_r и V_{tan} снимались с векторной диаграммы при помощи программы *AutoCAD*, поэтому могла возникнуть некоторая ошибка в значениях скоростей при снятии экспериментальных данных. На входе задавался осредненный по двум лучам зондирования поток. Параметры турбулентности на входе задавались с использованием гидравлического диаметра и значения интенсивности турбулентности. В качестве гидравлического диаметра брался диаметр входа в отсасывающую трубу. Интенсивность турбулентности рассчитывалась по формуле [5]

$$I = 0,16 \text{ Re}^{-\frac{1}{8}}. \quad (2)$$

На выходе из расчетной области были апробированы два вида граничных условий: условие свободного протекания (*Outflow*) — в этом случае

фиксировался расход на выходе; статическое давление (*Pressure-outlet*) — в этом случае задавалось статическое давление на выходе и параметры турбулентности на случай возникновения обратного течения. На стенке задавалось условие прилипания. Шероховатость стенки не учитывалась.

Уравнения решались с применением аппроксимации второго порядка. В ходе решения отслеживались невязки (см. табл. 1), средневзвешенная по расходу скорость на выходе из рабочей области и значение модуля скорости в точке мониторинга.

В табл. 1: *Invis* — невязкая жидкость; *RKE* — *Realizable* ($k - \varepsilon$)-модель; *RNG* — ($k - \varepsilon$)-модель; *RSM* — модель рейнольдсовых напряжений; *SKE* — стандартная ($k - \varepsilon$)-модель; *SA* — модель Спаларта—Алмараса; $Q_{\text{вых}}$ — расход на выходе из отсасывающей трубы; $Q_{\text{вх}}$ — расход на входе в отсасывающую трубу.

Процесс вычислений считался сущедшимся, если разность расхода на входе и на выходе, отнесенная к величине расхода на выходе, была меньше 10^{-6} . В рассматриваемом случае не удалось получить решение задачи для невязкой жидкости, для вязкой жидкости с использованием *RNG* модели и модели Спаларта—Алмараса.

Расчет проводился на четырех сетках. Ниже приведено сравнение решений, полученных с использованием модели рейнольдсовых напряжений, и результатов эксперимента.

Как видно из рис. 3, распределение скорости, полученное численным решением с использованием всех рассматриваемых сеток, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Наилучшее согласование расчетного и экспериментального полей скоростей наблюдается при использовании «*map*»-сетки.

На «*map*»-сетке в первом приближении проверялась сеточная сходимость решения. Численные

Таблица 1

Таблица невязок определения расхода в зависимости от моделей турбулентностей и расчетных сеток

Модел.	<i>Map-rude</i>						<i>TGrid</i>	<i>TGrid_BL</i>	<i>Map-fine</i>
	<i>Invis</i>	<i>RKE</i>	<i>RNG</i>	<i>RSM</i>	<i>SKE</i>	<i>SA</i>	<i>RSM</i>	<i>RSM</i>	<i>RSM</i>
$\frac{Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}}}{Q_{\text{вх}}}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$5,9 \cdot 10^{-9}$

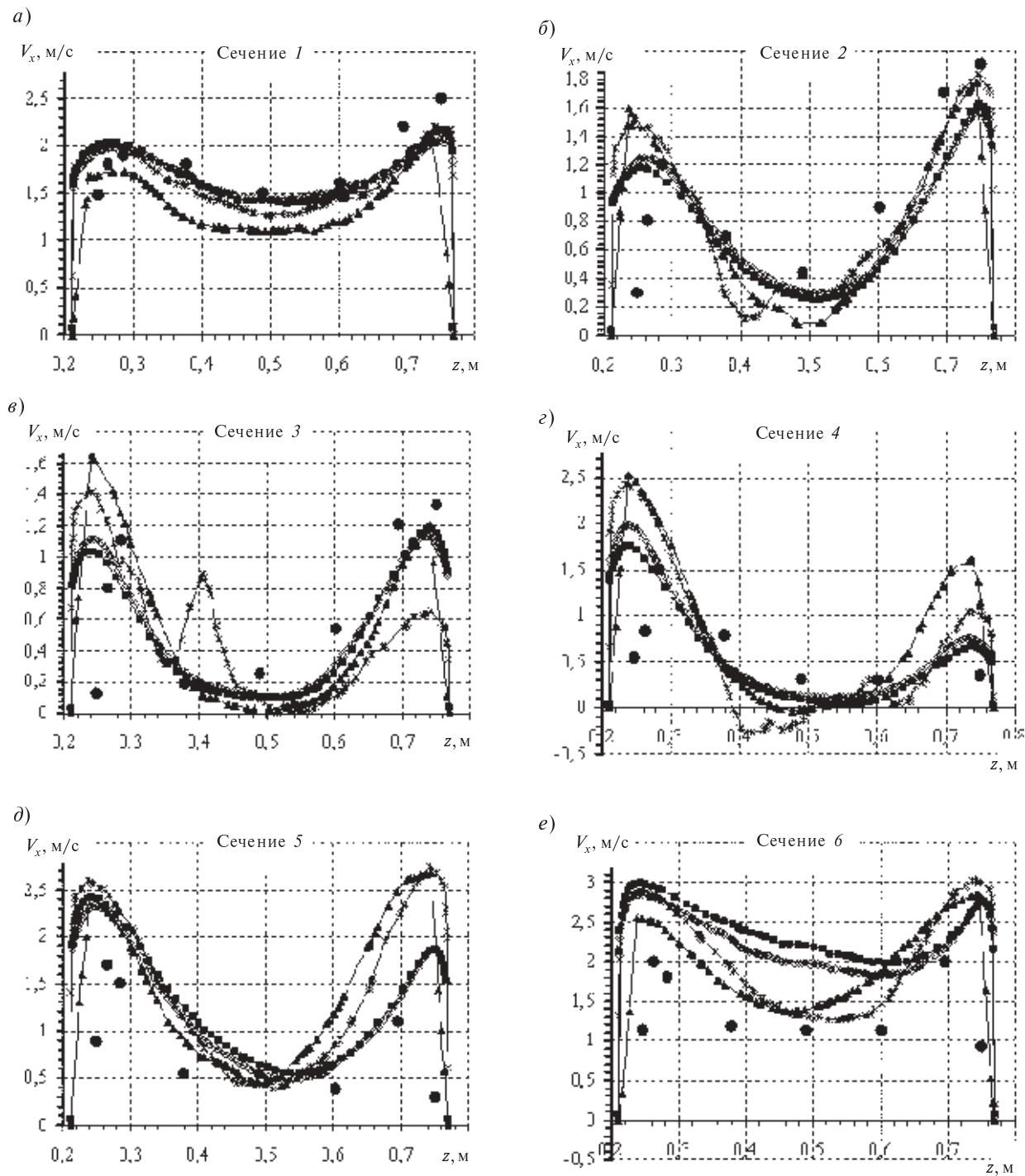


Рис. 3. Распределение составляющей скорости V_x по лучам зондирования:
 ● — эксперимент; ■ — mah rude; ▲ — TGrid; ◇ — map-fine; ✕ — TGrid_with_BL

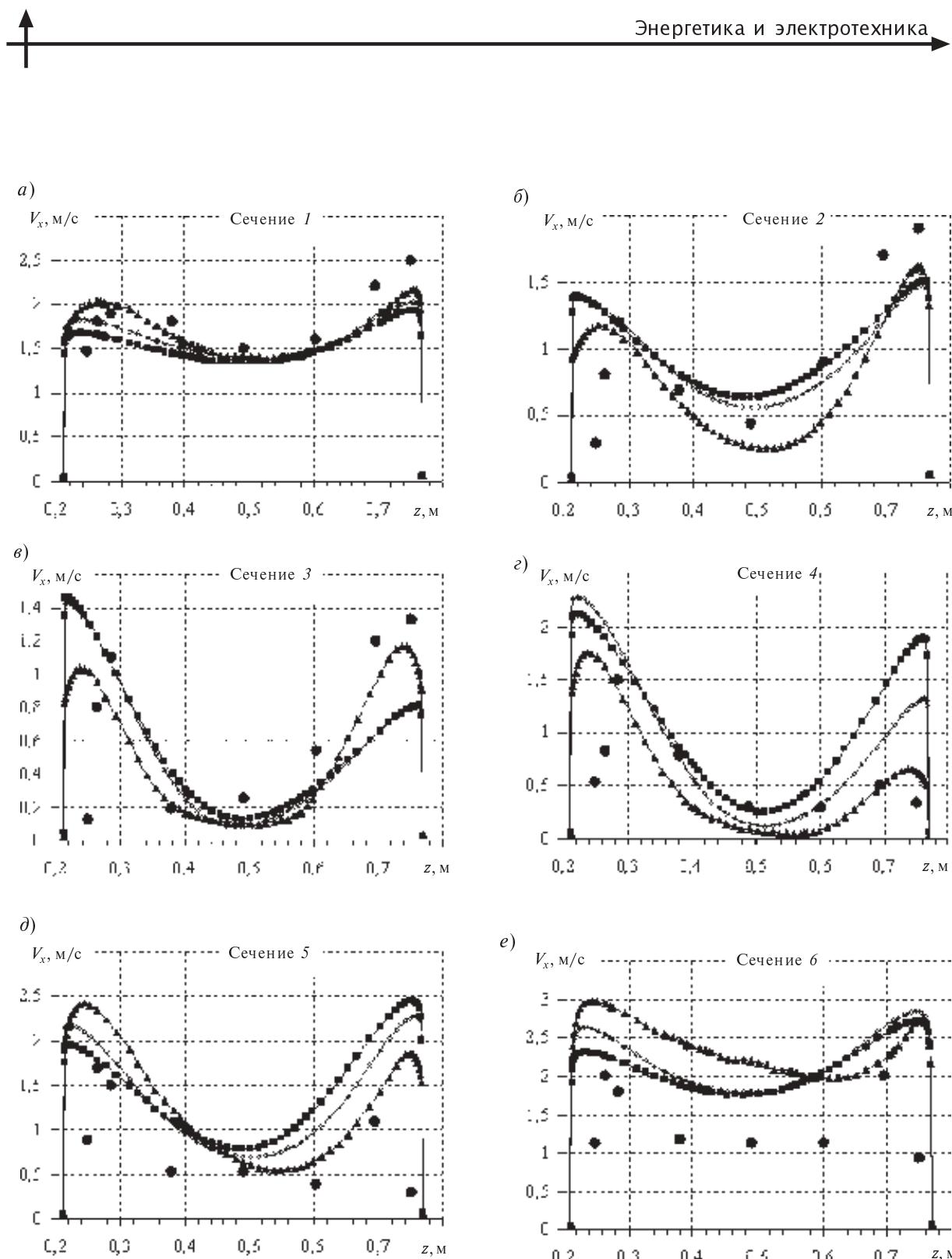


Рис. 4. Распределение составляющей скорости V_x по лучам зондирования:
 ● — эксперимент; ▲ — RSM; ■ — SKE; ◇ — RKE

эксперименты выявили хорошее согласование результатов, полученных на грубой «*map*»-сетке и «*map*»-сетке высокого разрешения.

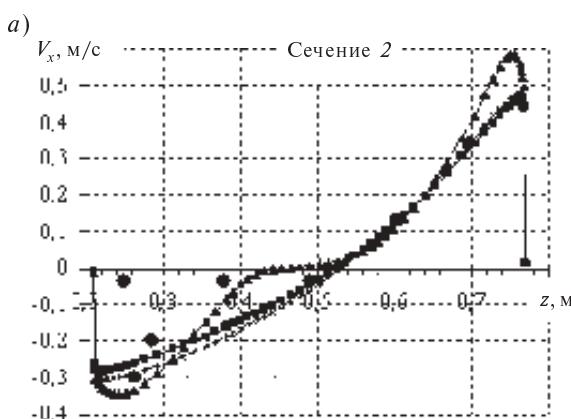
Как и ожидалось, *TGrid*-сетка дает достаточно грубое описание пограничного слоя. Расчет с использованием тетраэдralной сетки с призматическими ячейками в области пограничного слоя дает неплохой результат, в том числе и в области пограничного слоя. Однако количество ячеек в этой сетке намного больше, чем в «*map*»-сетке.

Все последующие исследования проводились на грубой «*map*»-сетке. Были получены и сравнены решения с использованием нескольких моделей турбулентности: *RSM*, *SKE* и *RKE* (рис. 4–6). Результаты расчета удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента. Наибольшие расхождения наблюдаются в пристеночных областях (при малых значениях z). Это может быть вызвано несколькими причинами:

неточным заданием скоростей на входе в отсасывающую трубу (здесь задавался осесимметричный поток, в то время как действительный поток в этом сечении не имеет осевой симметрии), что могло оказаться на величине скорости и расхода на выходе. Эта ошибка была оценена и составила

$$\frac{Q_{\text{расч}} - Q_{\text{эксп}}}{Q_{\text{расч}}} = \frac{0,906 - 0,874}{0,906} 100 \% = 3,532\%; \quad (3)$$

возможной погрешностью при снятии значений скоростей с векторных диаграмм, полученных в эксперименте;



возможным некоторым искажением структуры потока в области, где при проведении эксперимента располагался зонд в (сечениях 6–8 поперек потока).

В ходе эксперимента были получены составляющие скорости по оси « y », по лучу зондирования 1. На рис. 6 приведены результаты сравнения расчета и эксперимента в сечениях 2 и 5. Для компоненты скорости V_y наблюдается хорошее качественное согласование расчета с экспериментом. Приведенные результаты показывают преимущество *RSM*-модели турбулентности перед $(k - \varepsilon)$ -моделью. В центральной части потока эта модель наиболее точно описывает характер течения, в то время как $(k - \varepsilon)$ -модель дает более гладкий профиль по сравнению с экспериментальным.

Расчет проводился с использованием двух граничных условий на выходе: условия свободного протекания (*outflow*) и с заданием давления (*pressure-outlet*). В нашем случае расчетная область имеет два выхода, поэтому расход при использовании граничного условия *outflow* распределяется поровну между левым и правым выходным диффузорами, что неверно. Поэтому было решено, что использование этого граничного условия для расчета отсасывающих труб с двумя или более выходными диффузорами некорректно.

Течение в гидротурбине характеризуется сложными вихревыми структурами. Как правило, при режимах неполной (частичной) нагрузки эти вихревые структуры нестационарны. Характерным примером этого является прецессирующий вихревой жгут в отсасывающей трубе за рабочим колесом. Для исследования этого явления и его влияния на профиль выходных скоростей был проведен

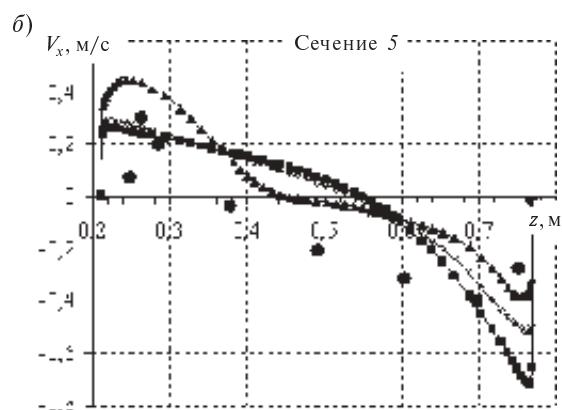


Рис. 5. Распределение составляющей скорости V_x по луче зондирования:
● — эксперимент; ▲ — *RSM*; ■ — *SKE*; ◇ — *RKE*

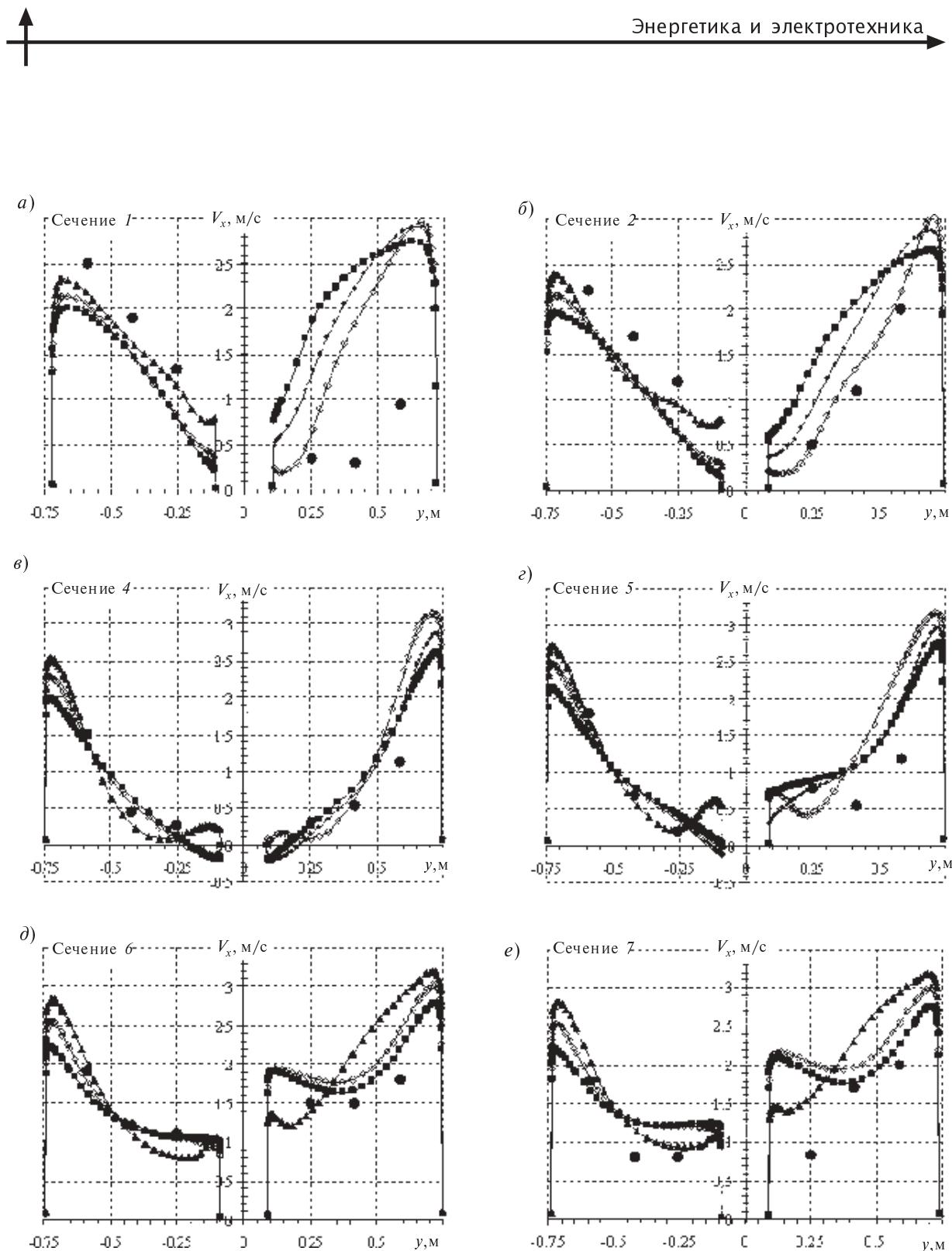


Рис. 6. Распределение составляющей скорости V_x перпендикулярно лучу зондирования:
 ● — эксперимент; ▲ — RSM; ■ — SKE; ◇ — RKE

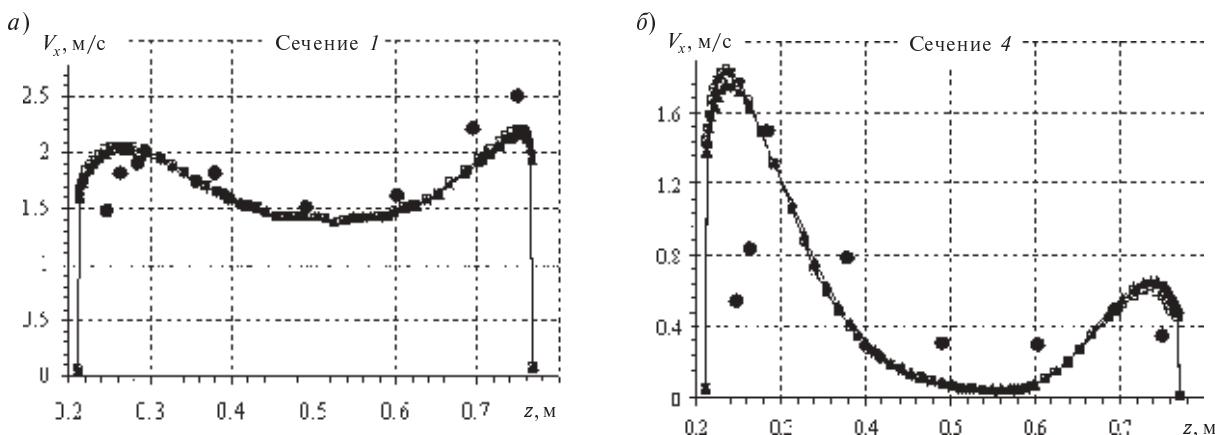


Рис. 7. Распределение составляющей скорости V_x по лучу зондирования в разные моменты времени:
 ● — эксперимент; ▲ — стационарное; + — $t = 4,75$; \times — $t = 4,95$; \square — $t = 5,221$

сравнительный анализ стационарного и нестационарного решений в сечениях 1 и 4 (рис. 7).

Подобная картина наблюдается и в других сечениях. Сопоставление стационарного и нестационарного решений показывает их хорошее совпадение при режимах максимальной мощности и максимального КПД.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Наиболее существенной причиной расхождения результатов расчета и эксперимента служит задание осредненного по лучам зондирования профиля скорости на входе в отсасывающую трубу, хотя течение в конусе сильно неравномерное. К другим факторам, приводящим к расхождению результатов расчета и эксперимента, можно отнести: погрешность обработки экспериментальных данных на входе в отсасывающую трубу (3,532 %); влияние шарового зонда на структуру потока; ошибки, связанные с проведением зондирования при разных напорах.

2. Наиболее адекватная модель для расчета турбулентного течения закрученного потока в

отсасывающей трубе гидротурбины — модель Рейнольдсовых напряжений.

3. Расчет проводился на четырех различных сетках: грубая «*map*»; подробная «*map*»; «*TGrid*»; «*TGrid*» с призматическим пограничным слоем. Сравнение результатов расчета, полученных на грубой и подробной «*map*»-сетках, показал, что увеличение числа узлов не приводит к существенному изменению решения. Расчет, проведенный на тетраэдральной сетке, показал, что пограничный слой описывается грубо и неточно. Введение призматических ячеек в область пограничного слоя приводит к более корректному описанию этой области, но при этом количество узлов резко возрастает. Наиболее оптимальной расчетной сеткой является грубая «*map*»-сетка, так как она имеет наименьшее количество узлов и позволяет с достаточной точностью описывать поле течения.

4. Для оценки влияния нестационарных эффектов на выходной поток из отсасывающей трубы был проведен нестационарный расчет, который выявил прецессию вихревого жгута с периодом 0,09 с. Установлено, что влияние жгута в оптимальных режимах слабо влияет на поле течения на выходе из отсасывающей трубы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

5. Mauri, S. Flow simulation in an elbow diffuser verification and validation [Текст] / S. Mauri, J.-L. Kueny, F. Avellan // Proceedings of the XXIst IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation. — 2002.
6. Mauri, S. Werle-Legendre separation in a hydraulic machine draft tube [Текст] / S. Mauri, J.-L. Kueny, F. Avellan // Proceeding of ASME FEDSM'02 ASME 2002 Fluids Engineering Division Summer Meeting Montreal. — Quebec, Canada. — 2002.



7. Kubota, T. Effect of Grid Size in CFD Code on Flow through Francis Turbine [Текст] / T. Kubota, F. Han, T. Kuwayama, J. Masuda // Proceeding of the XX IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation. — 2000.
8. Jianming, Y. Unsteady Turbulent flow analysis

through three-gorge draft tube by using LES [Текст] / Y. Jianming, L. Wenjun, W. Yulin, M. Zuyan // Proceeding of the XX IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation. — 2000.

9. Fluent 6.1 Documentation [Текст] / Fluent incorporated.

УДК 621.165-253.5:620.193.1

М.С. Зандер, В.А. Черников

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛОКА «СТУПЕНЬ — ВЫХОДНОЙ ДИФФУЗОР» СТАЦИОНАРНОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Задача проектирования высокоэффективного диффузора для преобразования выходной кинетической энергии в получение работы в случае реальной энергетической газовой турбины усложняется из-за наличия в проточной части диффузора силовых стоек, которые являются составной частью задней подшипниковой опоры ротора турбины. Выходной диффузор газовой турбины — тот агрегат, в котором продолжается рабочий процесс течения газа, существенно влияющий на коэффициент полезного действия и мощность газотурбинной установки (ГТУ). Однако, в отличие от процесса расширения газа в лопаточных аппаратах последней ступени, в выходном диффузоре происходит процесс сжатия рабочей среды со всеми его особенностями, связанными главным образом с явлениями в неустойчивых пограничных слоях при положительном градиенте давления вдоль потока, т. е. с возможными отрывными явлениями и резким снижением восстановительной эффективности диффузора.

Сочетание «ступень — диффузор» открывает совершенно новые возможности для повышения качества машины не только за счет газодинамики диффузора и последней ступени в отдельности, но и всего блока в целом. Такой эксперимент позволяет реализовывать количественную оценку взаимного влияния рабочего процесса в проточной части ступени на газодинамические качества диффузора и наоборот. Предвключенная ступень — не только генератор реального, входящего в диффузор потока, т. е. определяет действительные граничные условия, но и одновременно

представляет собою индикатор по оценке повышения эффективности всего блока в целом, которое обеспечивается диффузором. Это качество модели «ступень — диффузор» открывает новые перспективы для поиска оптимальной конструкции блока с целью достижения наилучших его газодинамических свойств.

Объект исследования

Исследование проводилось для турбины ГТУ мощностью 182 МВт и с начальной температурой газа 1500 °С. Мощность собственно газовой турбины при этом составляет около 520 МВт. Последняя, четвертая ступень турбины выполнена с относительным диаметром рабочего колеса (РК) $d_{2cp}/l_2 = 3,70$ и с закрученными лопатками направляющего аппарата (НА) и рабочего колеса. Закрутка лопаточного аппарата в сечении 1–1, между НА и РК, определяется уравнением

$$c_{1u}r_1^n = \text{const} \quad (1)$$

при неосевом выходе потока из РК. Профилирование лопаточного аппарата НА выполнено по закону «обратной закрутки» потока ($n = 0,608$), при которой угол $\alpha_{1\phi}$ уменьшается с увеличением радиуса. Угол выхода потока из НА $\alpha_{1cp} \cong 26^\circ$ на среднем диаметре d_{1cp} сечения 1–1, а угол выхода $\alpha_{2cp} \cong 65^\circ$ на среднем диаметре d_{2cp} сечения 2–2 за РК при номинальном режиме. Термодинамическая степень реактивности на среднем диаметре при этом $\rho_{Tcp} = 0,49$. Такой вид закрут-

ки последней ступени принят как типовой для всей этой серии стационарных ГТУ большой мощности. Поэтому результаты исследования имеют общий характер для турбин всего ряда мощностей этого типа ГТУ. Направляющие лопатки ступени спрофилированы для неосевого входящего потока, который поступает из предыдущей, третьей ступени. При этом угол $\alpha_{0\text{cp}}^*$ $\leq 60^\circ$ на среднем диаметре $d_{0\text{cp}}$ в сечении 0–0 при входе в НА четвертой ступени. Таким образом, четвертая ступень представляет собою ступень большой циркуляции, за которой структура входящего в диффузор потока имеет специфический характер. Сведения о влиянии таких особенностей ступени на аэродинамические качества диффузора и блока «ступень — диффузор» в опубликованной литературе отсутствуют.

Выходной диффузор рассматриваемой турбины состоит из кольцевой конической части с переменными углами раскрытия у периферии — от 23° на входе до 5° на выходе. Диффузор имеет цилиндрическую втулочную часть, в которой располагается задний подшипник. Крепление заднего подшипника к наружному корпусу осуществляется посредством пяти равнорасположенных по окружности радиальных силовых стержней, обрамленных в области проточной части диффузора профильными кожухами постоянного сечения по высоте проточной части. Про-

тяженность диффузора — 9,5 м, что составляет приблизительно длину всего турбокомпрессора и камер сгорания встроенного типа.

Методика экспериментальных исследований

Моделирование. Опыты проводились на модельном блоке «ступень — диффузор», выполненный в масштабе 1:6,3 натуральной величины, на экспериментальном стенде ЭТ-4 лаборатории турбиностроения имени И.И. Кириллова СПбГПУ. На рис.1 представлен продольный разрез аэродинамического стенда ЭТ-4. Подробное описание конструкции стенда ЭТ-4 и его информационно-измерительной системы приведено в [1, 2]. Отметим только, что модельные лопатки НА и РК выполнялись из материала Д16-Т методом фрезерования на 5-координатном станке с последующей полировкой поверхности пера лопаток и фрезерованием замковой части.

Благодаря такой технологии было обеспечено геометрическое подобие с приемлемой точностью натурной и модельной ступеней, включая моделирование профильной части лопаток, а также осевых и радиальных зазоров.

Входной направляющий аппарат (ВНА) применен для имитации потока за 3-й ступенью турбины, он спрофилирован с соблюдением распределения угла α_0 потока по высоте канала в соответствии с натурным.

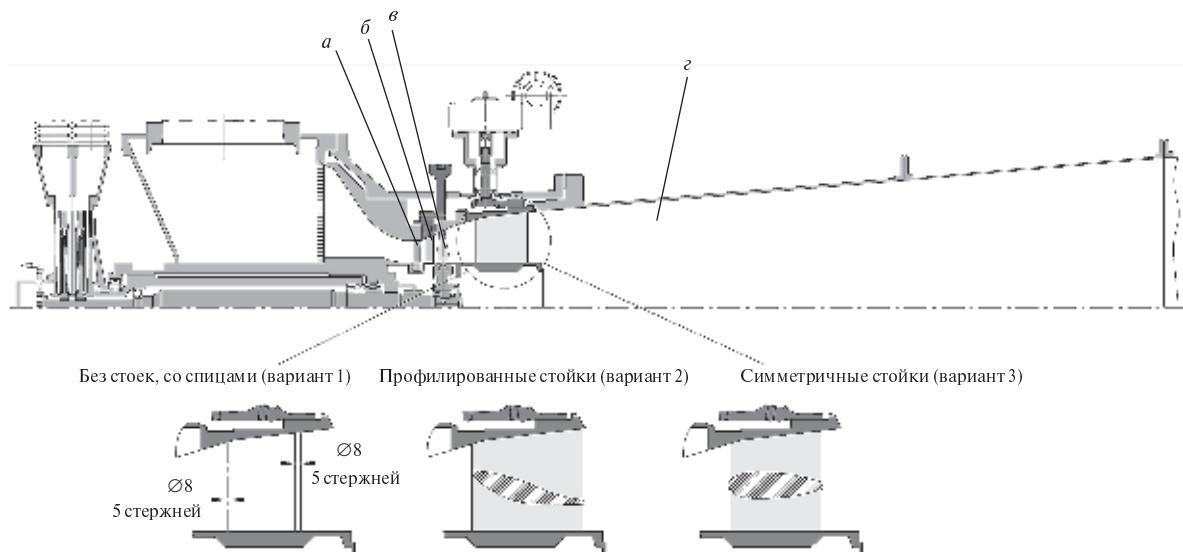


Рис. 1. Продольный разрез экспериментальной турбины ЭТ-4 лаборатории турбиностроения имени И.И. Кириллова с моделью блока «ступень — диффузор»:
 а — предварительный направляющий аппарат; б — направляющий аппарат;
 в — рабочее колесо; г — диффузор



Кинематическое подобие потоков выдерживалось по критериям $(u_2/C_0) = \text{idem}$, $\rho_k \cong \text{idem}$ и $\bar{c}_z = c_z/u_2 = \text{idem}$ для натурной и модельной ступеней на различных режимах работы [3].

Динамическое подобие рабочего процесса в натурной турбине и модели определялось приближенным равенством основных критериев подобия — чисел Маха, Рейнольдса и показателя адиабаты $k = c_p/c_v$. Числа Маха для модельных испытаний приведены в таблице 1 для всех исследованных режимов. В модели максимальное среднее число $M_{2cp} = 0,36$, в натурной ступени $M_{2cp} = 0,60$ при номинальном режиме работы машины. Числа Рейнольдса для РК, рассчитанные по средней скорости w_{2cp} в относительной системе и по хорде профиля РК в натуре и модели соответственно равны $Re_{W_{2cp}\text{нат}} = 1,3 \cdot 10^6$ и $Re_{W_{2cp}\text{мод}} = 0,5 \cdot 10^6$. Для выходного диффузора критерии Re , рассчитанные по эквивалентному диаметру кольцевого канала и входным параметрам потока, равны $Re_{D\text{нат}} = 3,9 \cdot 10^6$ и $Re_{D\text{мод}} = 1,5 \cdot 10^6$, что соответствует зоне приближенной автомодельности.

Интегральные характеристики ступени, диффузора и блока «ступень — диффузор». Коэффициент полезного действия ступени:

$$\eta = N/(\dot{m}H_0), \quad (2)$$

где N — мощность, развиваемая рабочим колесом ступени и определяемая по величине силы на рычаге гидротормоза, Дж/с; \dot{m} — массовый расход через ступень, кг/с; H_0 — изоэнтропийный перепад энталпий на ступень, Дж/кг, $H_0 = [k/(k-1)]RT_{0cp}^* \left[1 - (p_{2cp}/p_{0cp}^*)^{(k-1)/k} \right]$; p_0^* — давление торможения на входе в ступень, Па.

Коэффициент полезного действия системы «ступень—выходной диффузор»:

$$\eta_{+D} = N/(\dot{m}H_{0+D}), \quad (3)$$

где H_{0+D} — изоэнтропийный перепад энталпий на систему «ступень — выходной диффузор», Дж/кг;

$$H_{0+D} = [k/(k-1)]RT_{0cp}^* \left[1 - (p_{8cp}/p_{0cp}^*)^{(k-1)/k} \right].$$

Нормированная величина прироста КПД $\Delta\bar{\eta}_{+D}$, получаемого в результате применения выходного диффузора:

$$\Delta\bar{\eta}_{+D} = \frac{\eta_{+D} - \eta}{\eta} = \frac{\eta_{+D}}{\eta} - 1. \quad (4)$$

С учетом формул (2) и (3) получаем

$$\Delta\bar{\eta}_{+D} = \frac{\left[(p_{8cp}/p_{0cp}^*)^{(k-1)/k} - (p_{2cp}/p_{0cp}^*)^{(k-1)/k} \right]}{1 - (p_{8cp}/p_{0cp}^*)}. \quad (5)$$

Нормированная величина прироста КПД — простая, а самое главное, наиболее точная интегральная характеристика, поскольку исключает ошибки, которые могут возникать при измерении расхода или частоты вращения ротора; фактически ее точность определяется только точностью калибровки сканера давления и зондов.

Все значения давлений и температур в формулах (1)–(3) вычисляются как средние значения параметров потока в сечениях 0–0, 2–2 и 8–8. Методика вычисления этих величин по данным измерений трехмерного потока основана на использовании системы интегральных уравнений сохранения [2]. Уравнения составляются для осредненного одномерного потока, с одной стороны

Величины основных критериев подобия потока для исследованных вариантов блока «ступень — диффузор»

Тип стойки	Расход, кг/с	Критерий подобия	Значения критериев подобия при различных α_{2m}							
			60°	70°	75°	80°	85°	90°	95°	100°
Нестойка	10	u/C_0	0,577	0,63	0,655	0,691	0,727	0,756	0,803	0,833
		M_{2cp}	0,251	0,249	0,254	0,252	0,248	0,251	0,251	0,259
Графитированные стойки	10	u/C_0	0,7	0,783	0,809	0,857	0,874	0,903	0,961	1,015
		M_{2cp}	0,271	0,229	0,235	0,241	0,246	0,251	0,273	0,265
Симметричные стойки	11	u/C_0	—	0,622	—	0,665	—	0,739	0,749	0,793
		M_{2cp}	—	0,273	—	0,283	—	0,287	0,28	0,275

ны, и действительного трехмерного потока установленвшегося течения, с другой.

Для того чтобы понять, как влияют стойки на работу диффузора, был испытан диффузор без стоек (для крепления втулки применены спицы диаметром 8 мм), обозначенный далее как вариант 1 (рис. 1). Поскольку турбина рассчитана на неосевой выход потока на номинальном режиме, то вариант 2 диффузора — это вариант со стойками, спрофилированными при условии безударного натекания потока на среднем диаметре. Так как турбина работает не только на номинальном режиме, но и на режимах неполной загрузки, то вариант 3 — это симметричные стойки (рис. 1).

Результаты экспериментальных исследований

Чтобы оценить, как в количественном отношении влияет установка тех или иных стоек на работу блока «ступень — диффузор», обратимся к суммарным характеристикам, представленным на рис. 2 и 3. Для удобства анализа полученные результаты представлены в сравнениях с вариантом 1 диффузора без стоек.

Сравнивая КПД η ступени при наличии диффузора без стоек (вариант 1) и диффузора с симметричными стойками (вариант 3), можно констатировать, что наличие стоек практически не влияет на его величину. И в том, и другом случаях при номинальном режиме КПД составляет величину порядка 75–76 %. В то время как уровень КПД блока для диффузора с профилированными стойками (варианта 2) — выше, и он достигает 84 % (против 80 % для варианта 1).

При этом на нерасчетном режиме работы ступени, при угле выхода 100°, КПД блока для варианта с симметричными стойками выше на 5–7 %.

Таким образом, применение диффузора данной геометрии для рассматриваемой ступени дает большее приращение КПД блока для варианта 2. Так, для варианта 2 на номинальном режиме приращение КПД составляет 12 % против 7 % для варианта 1. Это повышение происходит за счет возрастания коэффициента восстановления давления C_p в диффузоре. Для варианта 2 величина коэффициента C_p выше примерно на 10–15 по сравнению с вариантом 1.

Отметим, что зависимости приращения КПД и C_p имеют определенные экстремумы, причем кривые $\Delta\eta_{+d} = f(u/C_0)$ — одинакового характера во всем исследованном диапазоне u/C_0 .

На рис. 3 представлены те же характеристики, что и на рис. 2, только для вариантов 3 и 1. Примененные профилированные стойки для данного блока «ступень — диффузор» оказывают отрицательное влияние на КПД ступени во всем исследованном диапазоне u/C_0 . КПД η ниже на 3–5 %. КПД блока в расчетном режиме остается на том же уровне, что и для варианта 1. Несколько более высокий КПД блока варианта 2 может объясняться более высокими числами Maxa (расход 11 кг/с против 10 кг/с для вариантов 1 и 3). С увеличением u/C_0 до значения 0,50–0,55 (что соответствует углу α_2 порядка 70°) наблюдаем рост КПД блока для обоих вариантов, но для варианта 3 это является максимумом, после которого идет достаточное резкое снижение КПД, в то время как для вариантов 1 и 2 максимум находится в пределах $u/C_0 = 0,60$, или приблизительно $\alpha_2 = 90–100^\circ$.

Относительное приращение КПД на номинальном режиме выше, чем для варианта 1 и достигает величины 10 %, т. е. почти, как и для варианта 2. Однако кривая имеет убывающий характер с ростом u/C_0 , в то время как для вариантов 1 и 2 кривые имеют форму синусоиды. Ступень восстановления давления на номинальном режиме, по сравнению с вариантом 1 выше почти на 20 %. Но кривые, как и для относительного приращения КПД, имеют убывающий характер.

Рассмотрим относительное приращения КПД $\Delta\bar{\eta}_{+d}$ и коэффициент восстановления давления C_p для всех трех случаев (рис. 4). На приведенных графиках можно выделить три области. Первая — это диапазон от номинального режима 0,47 ($\alpha_2 = 64^\circ$) до 0,55–0,60 ($\alpha_2 = 80–90^\circ$). Для вариантов диффузора со стойками уровень КПД выше, чем для варианта без стоек. То есть присутствие стоек для данной геометрии диффузора дает большее приращение КПД блока, что связано с более эффективным восстановлением давления в диффузоре. Забегая вперед, объясним этот факт тем, что кольцевой диффузор имеет очень большие углы раскрытия и поток для варианта 1 отрывается от втулки уже в сечении 2–2. Наличие же стоек способствует некоторому «стеснению» потока, что препятствует его отрыву от втулочной поверхности. Варианты 1 и 2 имеют минимальный уровень приращения КПД блока в области $u/C_0 = 0,55$, или $\alpha_2 = 70–80^\circ$.

Вторая область — от 0,55–0,60 ($\alpha_2 = 80–90^\circ$) до 0,70–0,75 ($\alpha_2 = 110–120^\circ$). В этой области для

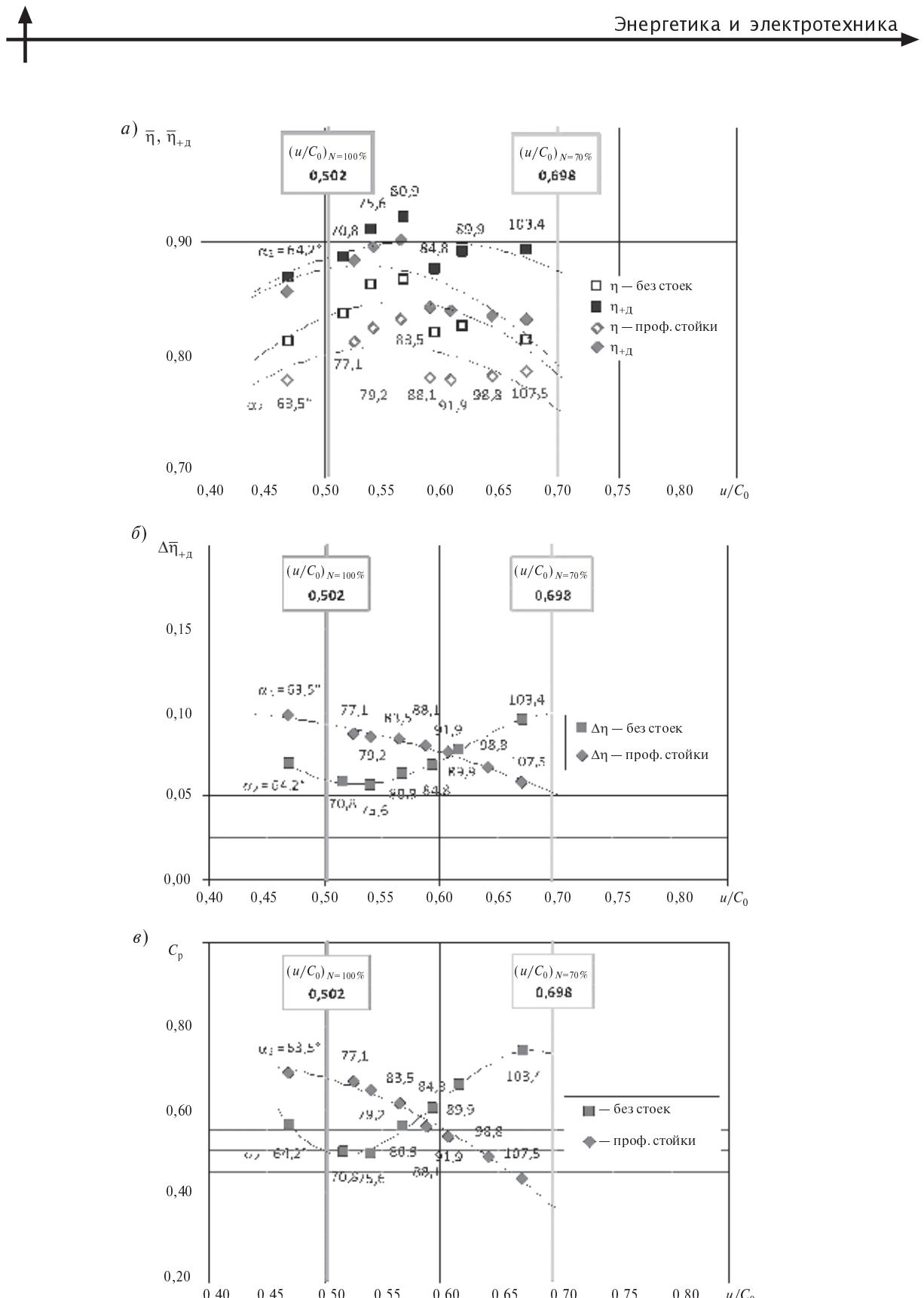


Рис. 2. Суммарные характеристики — КПД $\bar{\eta}$ ступени, $\bar{\eta}_{+d}$ и $\Delta\bar{\eta}_{+d}$ блока «ступень-диффузор» и коэффициент восстановления давления C_p диффузора — в функции критерия u/C_0 вариантов диффузора без стоек и с профилированными стойками

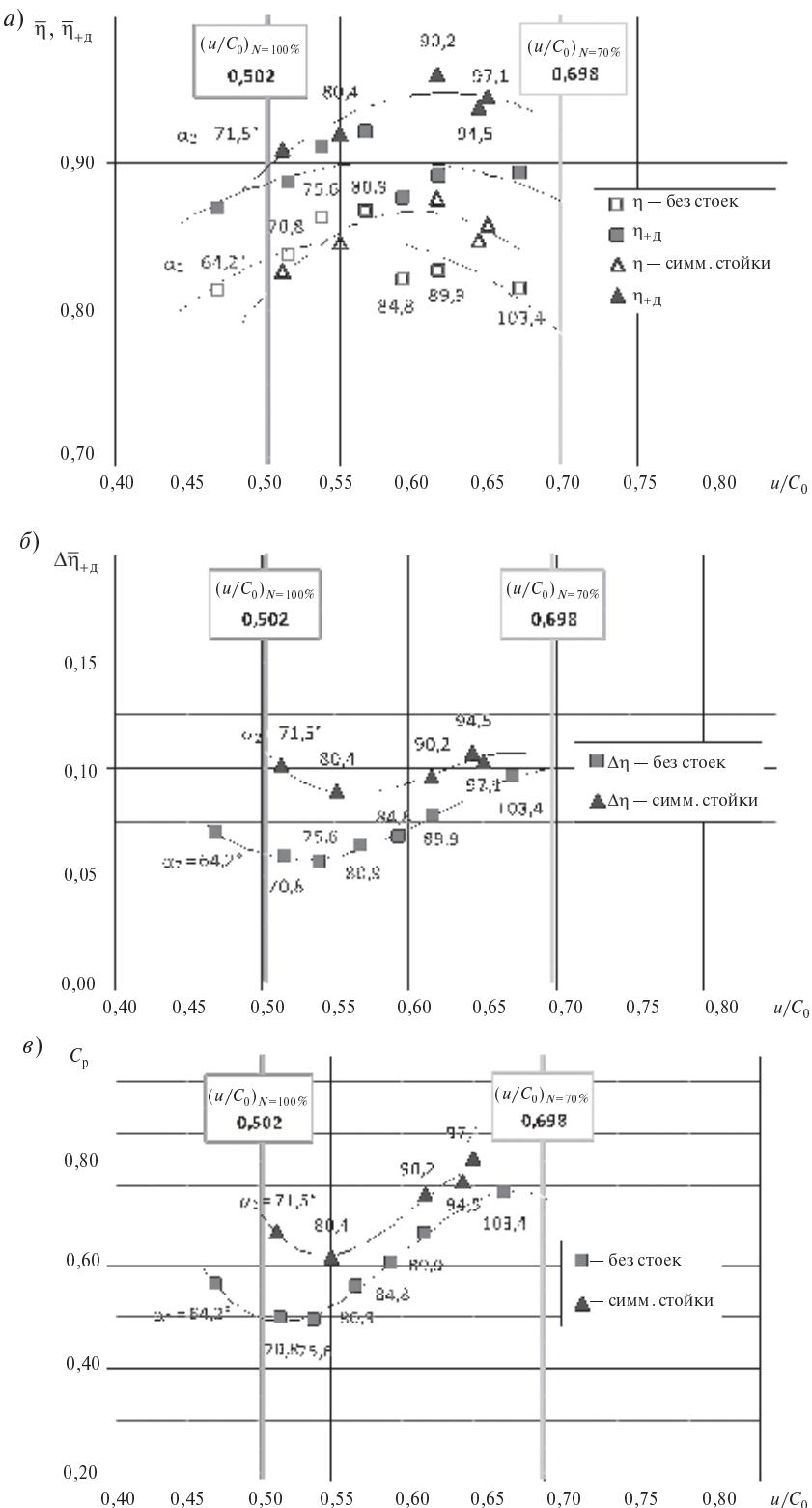


Рис. 3. Суммарные характеристики — КПД $\bar{\eta}$ ступени, $\bar{\eta}_{+d}$ и $\Delta\bar{\eta}_{+d}$ блока «ступень — диффузор» и коэффициент восстановления давления C_p диффузора в функции критерия u/C_0 вариантов диффузора без стоек и с симметричными стойками



вариантов 1 и 3 наблюдается максимум приращения КПД в районе $\alpha_2 = 110^\circ$. В то же время для варианта 2 имеет место резкое падение приращения КПД. Это связано с плохим обтеканием профилированных стоек на нерасчетных режимах. С переходом на нерасчетные режимы увеличиваются углы выхода потока, и при обтекании стоек появляются углы атаки, вызывающие отрывы потока от стоек.

Симметричные стойки спрофилированы под угол выхода потока $\alpha_2 = 90^\circ$ и имеют сильно скругленные входные кромки, что благоприятно сказывается на их обтекании в широком диапазоне u/C_0 .

Третья область — от 0,70–0,75 ($\alpha_2 = 110$ – 120°). В этой области наблюдается падение приращения КПД для всех вариантов.

Перейдем теперь к восстановительному процессу диффузора. Упомянутые выше экстремумы в районе $\alpha_2 = 70$ – 80° и $\alpha_2 = 100$ – 110° на графиках $C_p = f(u/C_0)$ прослеживаются более рельефно, чем для соответствующих кривых изменения КПД. На номинальном режиме восстановление давления для вариантов со стойками происходит намного более эффективно (почти на 15–20 %), чем для диффузора без стоек. При этом использование профилированных стоек дает небольшой выигрыш на номинальном режиме (порядка 3–5 %) и сильный отрицательный эффект на нерасчетных режимах, где углы атаки достигают величин 30–40°.

Вариант 2 дает высокий уровень C_p во всем исследованном диапазоне u/C_0 и показывает

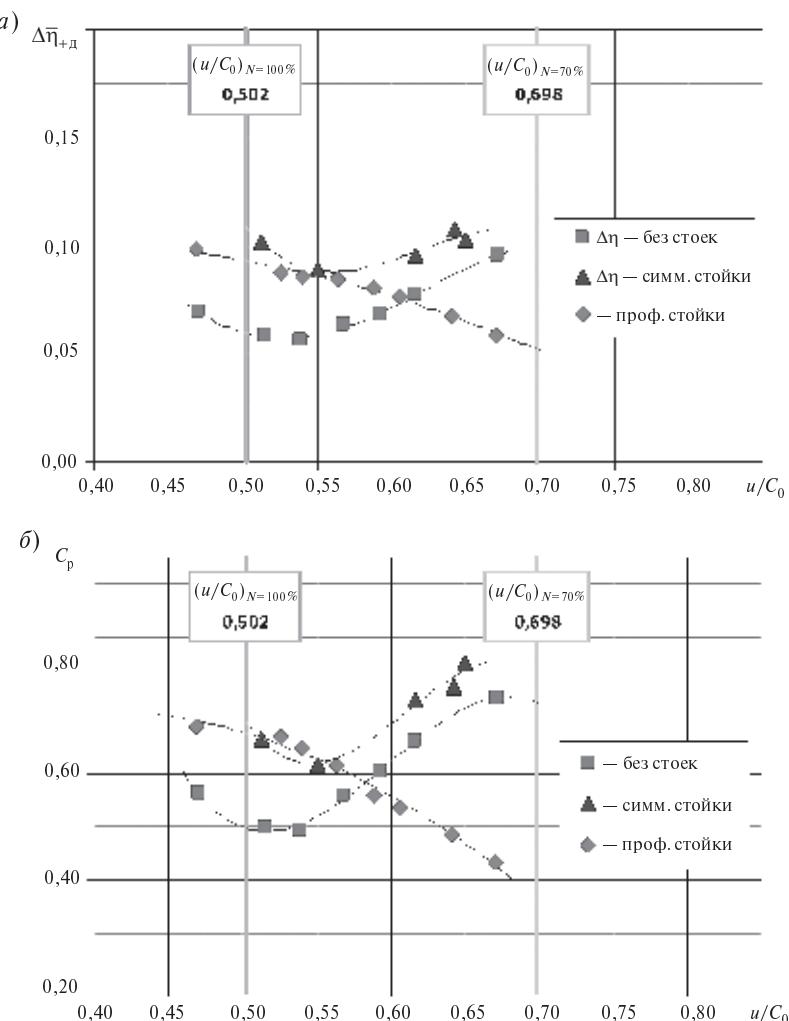


Рис. 4. Относительное приращение КПД блока «ступень — диффузор» и коэффициент восстановления давления для всех трех вариантов

наибольшую эффективность по восстановлению давления на режиме $\alpha_2 = 100\text{--}110^\circ$, где C_p достигает величины 80 %.

Вариант 1 имеет более низкую восстановительную эффективность и на номинальном режиме $C_p \approx 55\%$ во всей первой области: абсолютный минимум $C_p = 50\%$ на режиме $\alpha_2 = 70^\circ$ и абсолютный максимум — порядка 74 %, что на 6 % меньше, чем для диффузора варианта 2 — на режиме $\alpha_2 = 110^\circ$.

В области $\alpha_2 = 110^\circ$ наблюдается тотальное ухудшение восстановительного процесса для всех вариантов диффузора.

Заключая статью, подведем итоги.

Установка диффузора в базовом варианте с профилированными стойками на расчетном режиме при $u/C_0 = 0,502$ обеспечивает существенное повышение КПД блока «ступень — диффузор», составляющее величину 9,2 %. Такое повышение эффективности блока вполне оправдывает развитую конструкцию выходного диффузора для энергетических ГТУ большой мощности.

Эффективность исследованного комбинированного диффузора с предвключенной ступенью на базовом режиме при $\alpha_2 \approx 69^\circ$ характеризуется достаточно высоким коэффициентом $C_p = 0,68$. При переходе на сниженные режимы

восстановительный процесс в диффузоре существенно ухудшается из-за отрывных явлений в потоке, вызванных углами атаки при обтекании профилированных стоек, и при 70 % нагрузки величина C_p падает до значения 0,36.

Эффективность собственно ступени на расчетном режиме снижается примерно на 3 % из-за отрицательного обратного потенциального влияния пяти профилированных стоек на течение в ступени.

Сравнение результатов экспериментов для диффузоров с различными типами стоек и без них показывает, что на расчетном режиме установка любого типа стоек приводит к существенному улучшению восстановительного процесса, так как в пространстве расположения стоек выполнено специальное профилирование диффузора данной конструкции, которое в варианте без стоек приводит к отрыву потока.

Применение стоек с симметричным профилем сечения в исследованной конструкции диффузора обеспечивает меньшие потери кинетической энергии как в диффузоре в целом, так и в блоке «ступень — диффузор» во всем исследованном диапазоне режимов. Этот факт объясняется меньшей «чувствительностью» симметричных стоек к отрицательным углам атаки и меньшей поверхностью трения в потоке по сравнению с профилированными стойками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черников, В.А. Экспериментальный стенд для газодинамических исследований выходных диффузоров и патрубков турбин [Текст] / В.А. Черников.— Теплоэнергетика. 2008.— № 6.— С. 49—54.

2. Черников, В.А. Информационно-измерительная система аэродинамического стенда для исследований потока в проточной части отсека «ступень —

диффузор» и некоторые результаты испытаний на модели мощной газовой турбины [Текст] / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина.— Энергетические машины и установки.— 2008.— № 1.— С. 24—34.

3. Кириллов, И.И. Теория турбомашин [Текст] / И.И. Кириллов.— Л.: Машиностроение, 1972.— 536 с.

УДК 621.311.24

В.Г. Николаев

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РОССИИ

В 2010 году вложения в мировую ветроэнергетику (ВЭ) составили около 70 млрд USD (введено 35 ГВт новых ветроэнергетических станций

(ВЭС)). На проектирование ВЭС за рубежом отводится 5—6 %, или 3,5—4,2 млрд USD. Из них до трети (1,2—1,4 млрд USD) ушло на исследования



ветроэнергетического потенциала (ВЭП), обеспечивающие оценку целесообразности использования ВЭС в месте ее предполагаемой установки, а также энергетическое и экономическое обоснование эффективности использования ВЭС.

Исследования ВЭП включают обязательную в мировой практике ветровую разведку (одно-двухгодичные измерения ветра в местах предполагаемой установки ВЭС из расчета 1 метеорологическая мачта на 12–18 МВт установленной мощности ВЭС), сбор, обработку и совместный анализ данных ветровой разведки и многолетних измерений на метеостанциях, подбор базовых ветроэнергетических установок (ВЭУ) и проектирование их оптимальной конфигурации в составе ВЭС, а также обоснование инвестиций — обязательный документ для банковского кредитования ветроэнергетических проектов [1].

Расходы на ветровую разведку с последующей обработкой полученных данных по западным методикам составляют до 50 % от суммарных (до 700 млн USD). При этом годовые измерения ветра на одной метеомачте высотой до 80 м с трехуровневыми измерениями стоят до 100–120 тыс. USD, треть из которых уходит на анализ данных и численное моделирование [2].

Отметим, что реализация программы России по вводу ВИЭ до 2020 года, узаконенная постановлением Правительства РФ р-1 от 08.01.2009, подразумевает установленную мощность ВЭС к 2020 году в объеме до 7 ГВт. С учетом мирового опыта и российских условий объем затрат только на ветровую разведку и анализ по принятым за рубежом методикам составит до 140 млн USD.

Энергетическая эффективность использования ВЭС определяется мощностью, выработкой и ресурсом базовых ВЭУ, а экономическая эффективность использования ВЭС — себестоимостью производства энергии, окупаемостью и рентабельностью, которые зависят от капитальных и эксплуатационных затрат с учетом многолетней инфляции, выработки и закупочных цен на энергию ВЭС на протяжении периода ее эксплуатации.

Выработка ВЭС — производная от средней годовой (сезонной, месячной) мощности системы ВЭУ — ВЕТЕР и технической готовности (ТГ) ВЭУ, зависящей от простоев во время проведения регламентных работ и ремонта. Мощность системы ВЭУ — ВЕТЕР $P_{\text{ВЭУ}}^T$ за период T выражается функцией

$$P_{\text{ВЭУ}}^T = K_{\text{тр}}^n K_{\text{нид}} \left(\rho / \rho_0 \right) \left\{ \int_{V_0}^{V_{\text{бyp}}} p(V) f(V) dV \right\}, \quad (1)$$

где $K_{\text{нид}}$ — коэффициент неидеальности ВЭУ, определяемый инерционностью систем управления, неоднородностью обдувки ветроколеса (ВК), ветровым экранированием ВЭУ друг другом и окружающими их препятствиями, потерями в сетях ВЭС и пр.; $V_{\text{бyp}}$ — буревая скорость, при которой ВЭУ останавливается во избежание поломок (буревой простой); V_0 — стартовая скорость ветра, ниже которой ВЭУ не работает (ветроэнергетический штиль); $f(V)$ — функция плотности распределения ветра по скоростям на высоте оси ВК ВЭУ, определяемая с погрешностью до 100 % и более (зависит от эффективности используемой методики); ρ_0 и ρ — соответственно стандартная (при нормальных атмосферных условиях) и фактическая плотность воздуха; $K_{\text{тр}}^n$ — коэффициент технической готовности ВЭУ, существенно меняющийся, как следует из практики, за период эксплуатации ВЭУ (20 лет); $p(V)$ — мощностная характеристика ВЭУ, достоверно определяемая экспериментально (в сертификационных испытаниях) или расчетным путем, зачастую завышающим ее на 5–7 % по сравнению с реальной за счет просчетов проектирования, неидеальности технической реализации, производства и эксплуатации ВЭУ, а порой и сознательного их завышения в конкурентной борьбе.

Основной источник статистически достоверных функций $f(V)$ за рубежом — повторяемость скоростей ветра по градациям $f(V_i)$, которые определяются по многолетним данным метеослужбы (для России, стран СНГ и Балтии дополнительным информационным источником служат данные аэрологических станций (АС)). Аппроксимирующих аналитических функций $f(V)$ известно свыше десятка, из которых за рубежом наиболее распространены двухпараметрическая функция Вейбулла, определяемая по данным ветровой разведки и ближайшей метеостанции. Определение $f(V)$ основано на большем или меньшем соответствии средней скорости ветра параметров $f(V)$, определение которых (срочных, месячных, сезонных) является важнейшей задачей ветровых изысканий.

Теоретическое моделирование $f(V)$ на высоте оси ВК $H_{\text{ВК}}$ производится подъемом $f(V)$, опреде-

ленной по данным метеостанций для высоты 10–12 м или измерений на метеомачтах с помощью более или менее точно установленного закона нарастания скорости ветра $V(h)$ с высотой h .

Высотные профили скорости ветра $V(h)$ в приземном слое атмосферы (ПСА) до высот 200 м обычно описываются двухпараметрическими логарифмическими законами типа

$$V(h) = (U_*/k) \ln (h/z_0) \quad (2)$$

$$V(h) = (U_*/k) [\ln (h/z_0) + 5,75h/H], \quad (3)$$

где $k = 0,4$ — постоянная Кармана; z_0 — масштаб шероховатости поверхности; U_* — скорость трения, связанная по гидродинамической теории с поверхностным трением μ зависимостью $|\mu| = \rho U_*^2$; $H = U_*/(6f)$ ($f = 2\Omega \sin \varphi$ — параметр Кориолиса; Ω — частота вращения Земли; φ — широта в градусах). Параметр U_* определяется по данным ближайших метеостанций, а параметр z_0 численно моделируется в месте возведения ВЭУ с некоторой погрешностью исходя из накопленных представлений о масштабе шероховатости для различных типов рельефа. Из теории и эксперимента известно, что модели (2) и (3) достаточно точно описывают реальные распределения $V(h)$ лишь в случае нейтральной стратификации атмосферы в приземных слоях до высот 30–50 м [1, 2].

Погрешности моделирования скоростей ветра на высоте осей ВК в местах установки ВЭУ

при использовании (2) и (3) могут быть обусловлены двумя причинами. Первая состоит в физической неправомочности логарифмического закона для описания высотных профилей скорости ветра на высотах более 50 м при наличии распространенной на территории России термической стратификации в ПСА. Вторая причина связана с погрешностями определения скорости на высоте метеоизмерений V_{meteo} и значения параметра шероховатости z_0 ; чувствительность моделей (2) и (3) к точности их задания демонстрируют рис. 1 и 2.

Для сравнения на рис. 1 и 2 приведены графики среднегодового профиля скорости, построенного согласно отечественной методике [1] по данным многолетних измерений ветра на метео- и аэроранциях в г. Бологом, расположенных в типичных для европейской части России ветро-климатических условиях.

Из-за первой причины профиль (1) существенно занижает значения скоростей на высотах 60–100 м. Для примера в табл. 1 приведены результаты сравнения многолетних (1960–1980-е годы) аэрометрических измерений на 55-и аэроранциях России средних годовых скоростей и удельных мощностей ветра для высот 100 и 200 м с данными моделирования в [3] по методике WASP датского института RISO, которая используется в качестве расчетного модуля большинства зарубежных компьютерных систем при проектировании ВЭС (WindFarm, WindFarmer, WindMaster, WindPro).

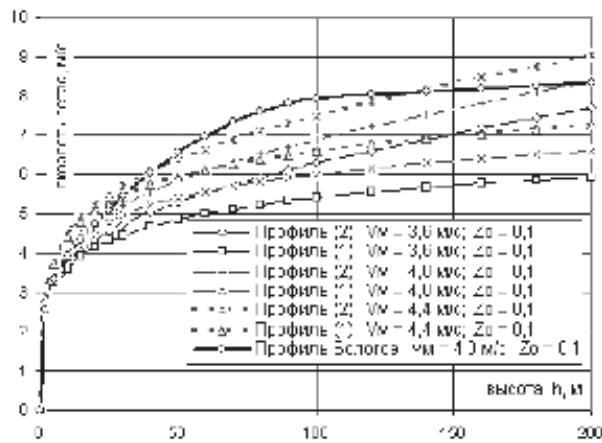


Рис. 1. Зависимость моделируемой скорости ветра в приземном 100-метровом слое атмосферы от значений скорости V_{meteo}

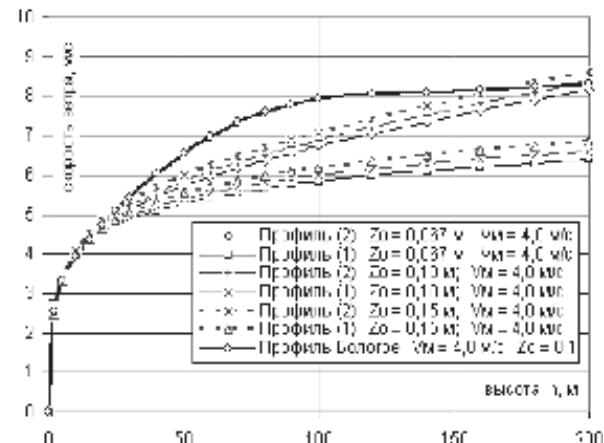


Рис. 2. Зависимость моделируемой скорости ветра в 100-метровом ПСА от значения параметра шероховатости z_0



Таблица 1

Сравнение данных моделирования и аэрометеорологических измерений

Направление показателя	Значения показателя на высотах			
	100 м		200 м	
	Расчет по методике			
	Ф. ИКОМ-Р	WASP	Ф. ИКОМ-Р	WASP
Средняя из 55 МС. скорость ветра, м/с	6,73	5,60	7,16	6,86
Среднее квадратическое отклонение, %	0	26,5	0	21,6
Средняя используемая мощность ветра, Вт/м ²	561,0	293,1	818,3	510,5
Среднее квадратическое отклонение, %	0	69,70	0	63,84

Согласно анализу работы [2] на 51 из 55 аэротанций, представляющих всю территорию России, характеристики ветра, рассчитанные по методике WASP, занижают значения средних годовых скоростей и удельных мощностей ветра по сравнению с данными аэротанций в среднем на 26,5 и 69,7 % на высоте 100 и на 21,6 и 63,8 % на высоте 200 м, при этом на ряде аэротанций указанные расхождения на высоте 100 м достигают 1,5 раза и более, что намного превышает допустимые практикой (согласно [1]) погрешности определения скорости ($\leq 10\text{--}12\%$) и мощности ветра ($\leq 20\text{--}25\%$).

Анализ различий скоростей ветра на соседних метеостанциях указывает на возможные погрешности определения скоростей ветра в местах предполагаемой установки ВЭУ до 15–20 % [2]. Но уже при погрешности 10 % в определении V_{meteo} , как видно из рис. 2, использование аппроксимаций (2) и (3) приводит к разбросу скоростей ветра на высоте 100 и 200 м более 13 %. Моделирование параметра z_0 даже с двукратной погрешностью — трудная задача [1], но и погрешность ее моделирования в 50 % приводит к разбросу скоростей ветра на высоте 100 м в 12–15 % при использовании аппроксимации (2).

Существенные расхождения результатов расчетных методик с данными эксперимента привели к развитию модели (2) и ее трансформации в модель (3), позволяющую уменьшить погрешность определения скорости на высотах 50–150 м. Но согласно методическим расчетам автора использование модели (3) вместо (2) приводит к уменьшению различий модельных средних годовых скоростей ветра с аэрометеорологическими данными для высоты 100 м примерно вдвое, однако величина невязки результатов модели и экс-

перимента при этом остается весьма существенной (13–18 %).

Занижение расчетных данных наиболее авторитетной за рубежом методики WASP далеко не безобидно, поскольку в соответствии с ними многие регионы РФ (практически вся континентальная часть европейской территории и Западной Сибири, Урал и др.) априори должны быть отнесены к неперспективным для развития отечественной ветроэнергетики [3].

Как показывает опыт работы с методикой WASP, пределы ее точности ограничены в конечном итоге принципиально неизбежной для методов экстраполяции математической необходимости при большом удалении на высоту от уровня метеорологических измерений. Для повышения точности моделирования скорости ветра по методике WASP принципиальное значение имеет наличие данных двух- или трехуровневой ветровой разведки, позволяющей перейти при реконструкции вертикального профиля скорости к более точным процедурам высотной интерполяции данных. Именно этим объясняется настоятельность зарубежных рекомендаций для России по проведению ветровой разведки даже в тех местах, где по данным отечественных метеорологических и аэрометеорологических измерений ВЭП заводом достаточен по любым международным критериям для его эффективного использования.

Отдавая должное высокой квалификации и технической оснащенности наших зарубежных коллег и их многолетним и плодотворным усилиям по развитию методик моделирования ВЭП на основе данных метеорологических и мачтовых измерений, хотелось бы указать на результаты российских специалистов, в том числе автора, дающие существенные дополнительные

возможности повысить точность и эффективность, а также минимизировать затраты на моделирование ветровых характеристик и проектные ветроэнергетические изыскания на территории России, стран СНГ и Балтии.

Современные возможности высокоточного определения ВЭП и энергетической эффективности ВЭУ в отдельных пунктах и районах территории России, стран СНГ и Балтии связаны с максимально полным использованием метеорологической информации из авторских баз данных и расчетно-поисковых компьютерных систем, а также с новыми представлениями о закономерностях и особенностях географического, высотного и временного распределения климатических характеристик ветра на территории бывшего СССР и развитыми на этой базе передовыми статистическими и численными гидродинамическими моделями [1].

Схема развитого автором подхода приведена на рис. 3.

Методической основой определения региональных и локальных параметров ветра и ВЭР является их физическое и статистическое моделирование по данным близлежащих метео- и аэростанций с учетом свойств окружающего рельефа и подстилающей поверхности. Массовые расчеты ветровых характеристик, а также мощностей и выработок ВЭУ для отдельных пунктов и областей России и СНГ обеспечиваются в методике, принятой в специализированной авторской компьютерной системе «Флюгер» [1]. Она включает базу данных многолетних измерений ветровых характеристик в ПСА на государственной сети из примерно 3600 метео- и 146 аэростанций России и бывшего СССР за период с 1960-х годов по настоящее время, а также программные средства для статистического и численного моде-

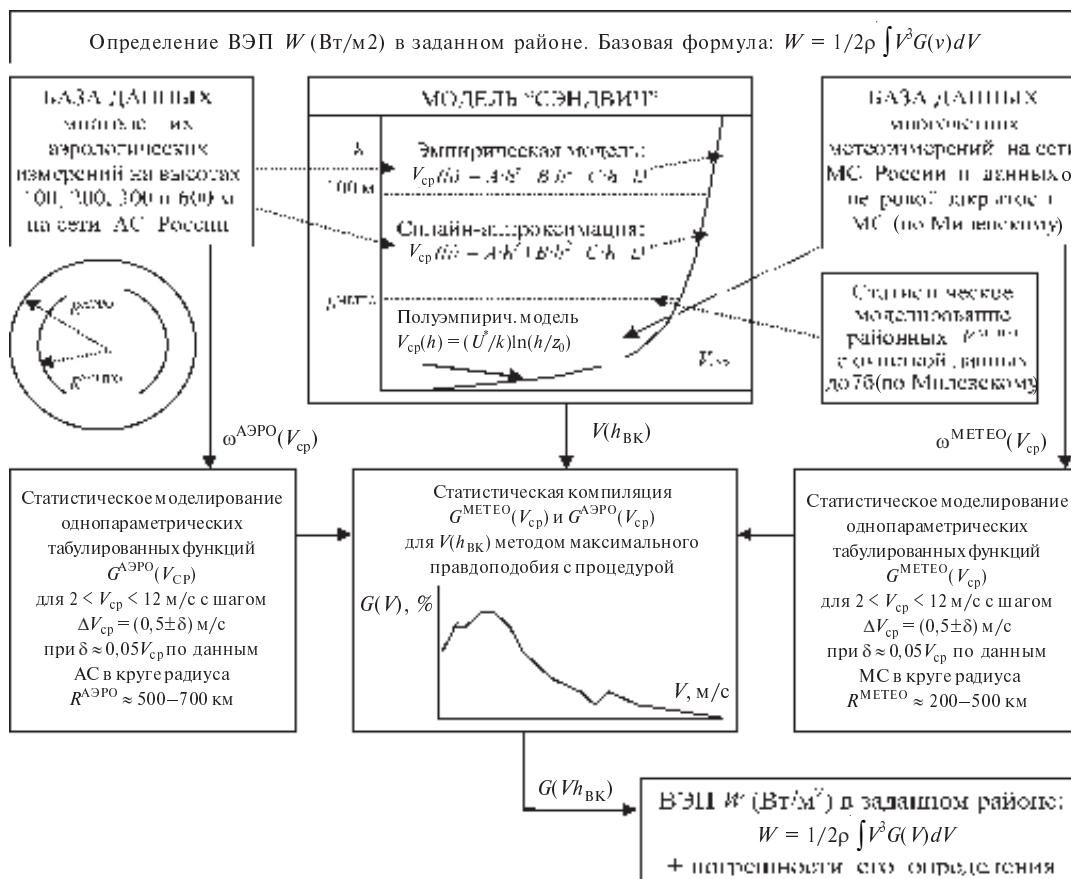


Рис. 3. Блок-схема авторской методики определения ВЭП в заданном районе РФ:

R — радиус подобия ветроклиматических условий;

ω — повторяемость скорости ветра по градациям



лирования ВЭП, расчета энергетической и экономической эффективности ВЭУ и ВЭС, а также графического и картографического представления результатов. Методика моделирования параметров ВЭП и ВЭУ в местах их предполагаемого использования реализуется по схеме рис. 4.

Основные положения определения ВЭП и энергетической эффективности ВЭС в России изложены в работе «Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения» [1].

Методика определения энергетических показателей ВЭП и ВЭС построена на установленных в [1] закономерностях географического, высотного и временного (многолетнее, сезонное, суточное) распределения ветровых характеристик на территории России и бывшего СССР, в том числе:

установление достоверных региональных статистических связей между средними сезонными и годовыми скоростями ветра с характеристиками подстилающей поверхности в приземном слое в местах и на высотах метеоразведки 8–16 м (по многолетним данным государственной сети метеостанций с учетом известных классификаций рельефа и подстилающей поверхности);

создание на основе полученных статистических связей и классификации метеостанций методики «очистки» данных — приведения данных метеоразведок скоростей и направлений ветра к условиям ровной поверхности без экранирующих ветер препятствий;

установление статистически достоверных значений, а также качественных и количественных отличий средних сезонных повторяемостей ветра по градациям скорости в ПСА в разных климатических регионах России;

построение наиболее адекватных из известных и статистически достоверных региональных табулированных функций сезонного распределения ветра по градациям скорости в ПСА в разных климатических регионах России;

построение на основе данных метеорологического и аэрологического зондирования пограничного слоя атмосферы нового класса наиболее достоверных из известных многоуровневых моделей высотного распределения скорости ветра в 300-метровом пограничном слое атмосферы для большинства представительных климатических регионов России. Максимально статистически и физически достоверной из развитых моделей оказывается разработанная нами трех-

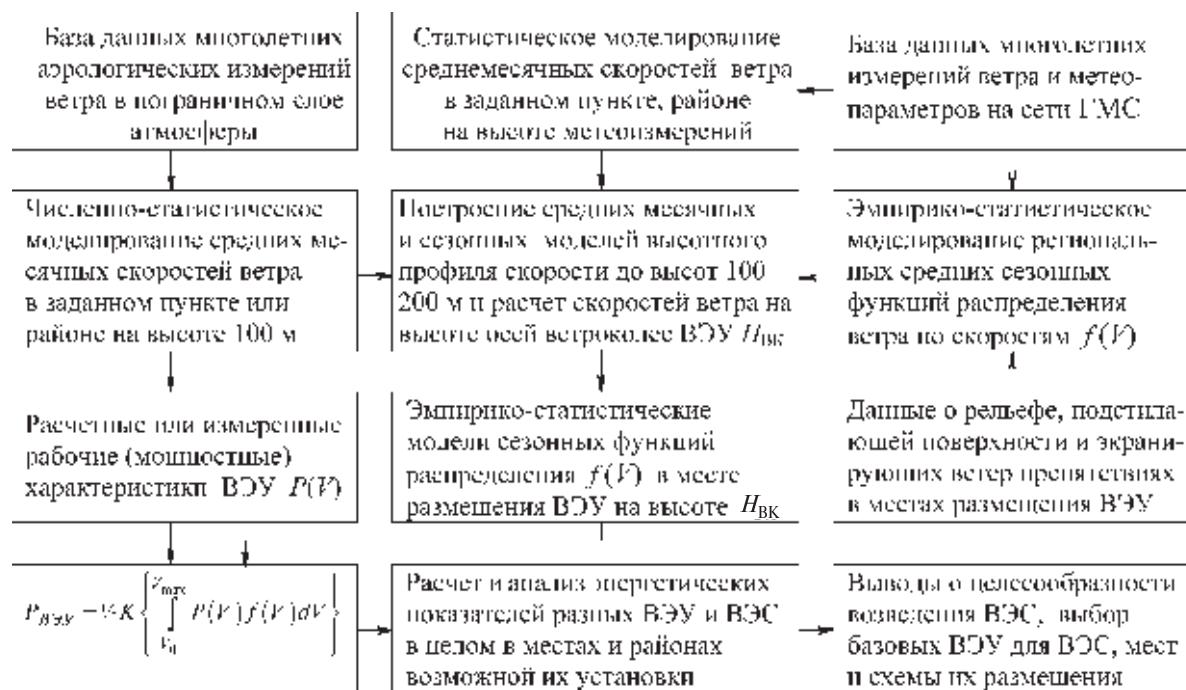


Рис. 4. Схема определения характеристик ВЭП и энергетической эффективности ВЭС в отдельных местах и районах их предполагаемого использования

слойная модель «Сэндвич», в которой профиль скорости ветра в нижнем (до 10–15 м) подслое моделируется физически и статистически обоснованным логарифмическим профилем, в верхнем слое (100–600 м) используется кубическая аппроксимация по аэрологическим данным с уровняй 100, 200, 300 и 600 м, а в промежуточном слое (15–100 м) скорость аппроксимируется кубическим сплайном, обеспечивающим гладкость профиля во всем 600-метровом слое;

установление статистически достоверных средних сезонных значений ВЭП в приземном 200-метровом слое атмосферы на всей территории России;

установление новых перспективных для эффективного промышленного освоения «место-рождений» ветроэнергетических ресурсов [1] и выбор наиболее перспективных районов и площадок на территории России для реализации проектов ВЭС (рис. 5).

В основе прогноза значений технических, энергетических и экономических показателей современных ВЭУ и ВЭС по развитой автором методике:

установленные диапазоны региональной и сезонной изменчивости и пределах достоверности определения мощности ВЭУ по формуле (1) в заданном пункте или районе России;

установленная зависимость мощности ВЭУ с заданным диаметром ветроколеса от высоты ее

башни (мачты) и профиля направления ветра в ПСА;

построенная прогностическая модель много-
летней (на протяжении ресурса ВЭУ) изменчи-
вости технической готовности ВЭУ и ее энерго-
выработки;

установленные значения максимального и среднего регионального удельного (на единицу площади, занимаемой ВЭС) энергосъема ветроэнергетических ресурсов с использованием современных ВЭС;

определение реальной располагаемой мощности ВЭУ в заданном районе или пункте с учетом ее технических характеристик и характеристик ветра в ПСА;

Анализ основных особенностей и закономерностей географического и высотного распределения и временной (суточная, сезонная, годовая, многолетняя) изменчивости ВЭР и детальные оценки ветроэнергетических характеристик в отдельных регионах России позволили получить новые и уточнить известные (с учетом энергетической эффективности современных ВЭУ) данные о ВЭР, техническом и экономическом потенциале в отдельных регионах и в России в целом.

Расчет технического ВЭП по федеральным субъектам, округам и РФ в целом проведен автором с допущением о 10 %-ном землеотводе под ВЭС по средней для субъектов мощности ВЭУ

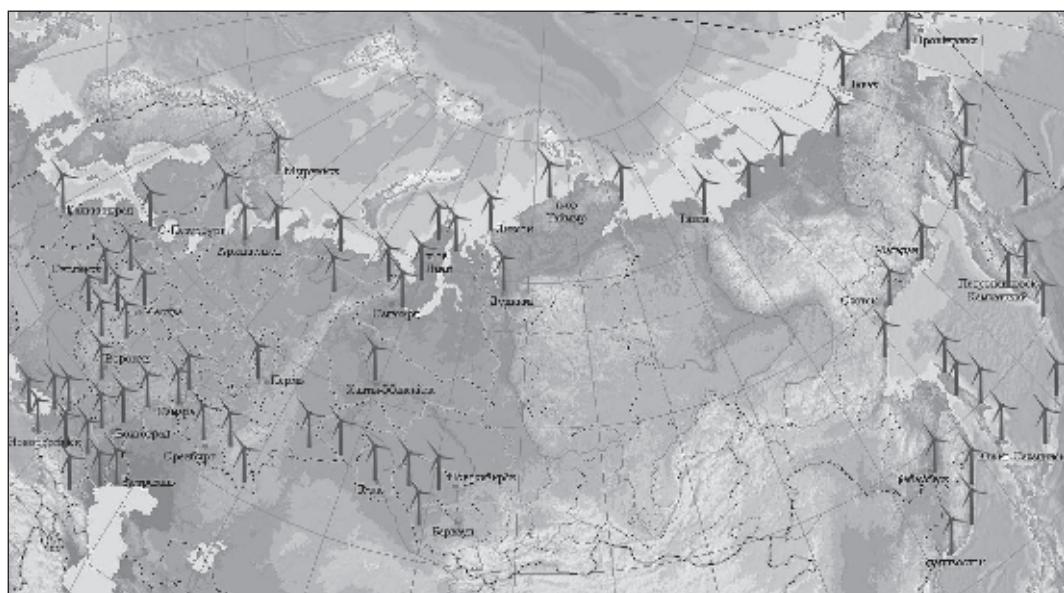


Рис. 5. Перспективные районы размещения ВЭС на территории России



V90 с диаметром ветроколеса 90 м и высотой башни 100 м (производство международной корпорации VESTAS — мирового лидера в строительстве ВЭУ). Средние за 20-летний ресурсный период работы ВЭУ коэффициенты в расчетной формуле (2) приняты равными $K_{\text{ннд}} = 0,81$ и $K_{\text{пп}} = 0,94$. Расстояние между ВЭУ по аэродинамическим соображениям (минимизация ветрового экранирования ВЭУ друг другом) выбрано равным 10 диаметрам ветроколеса ВЭУ.

На рис. 6 приведена карта распределения по территории России рассчитанных автором среднегодовых значений коэффициентов использования номинальной мощности $K_{\text{иум}}$ ВЭУ V 90 производства компании VESTAS. Среднее по России расчетное значение $K_{\text{иум}}$ ВЭУ V90 с башней 100 м составляет 19,6 %, чему (с учетом погрешности вычислений) соответствует средняя годовая мощность $P_{\text{вэу}}$ ≈ 588 ± 87 кВт. До 30 субъектов РФ обладают ветроэнергетическими ресурсами, достаточными для эффективного их использования по всем международным критериям ($K_{\text{иум}} \geq 28\%$). Однако меньшие средние значения $K_{\text{иум}}$ в субъекте РФ не означают отсутствия перспектив для развития в нем ВЭ.

В силу существенной ветроклиматической изменчивости в ряде субъектов РФ (Камчатская, Калининградская области) имеются районы с ВЭП, достаточным для его эффективной утилизации.

Данные о техническом и экономическом ветроэнергетических потенциалах России в целом и отдельных федеральных округов, полученные с учетом расчетных значений коэффициентов использования номинальной мощности ВЭУ VESTAS V90 для рассмотренных территорий, даны в табл. 2. Эти данные попадают в диапазон оценок ВЭП, приведенных в [4, 5]. Экономический потенциал, в соответствии с рекомендациями [4] определен как 0,5 % от технического потенциала.

Расчетные значения технического ВЭП РФ ($\approx 11500 \text{ ТВт}\cdot\text{ч}$) в 11,5 раза превышает годовую выработку электроэнергии страны в 2010 году. При этом, учитывая возможность более компактного размещения ВЭУ в составе ВЭС (менее 10 диаметров ветроколеса ВЭУ), полученные значения технического ВЭП следует рассматривать в качестве минимальной оценки.

Методика многократно апробирована при проведении проектных исследований и технико-

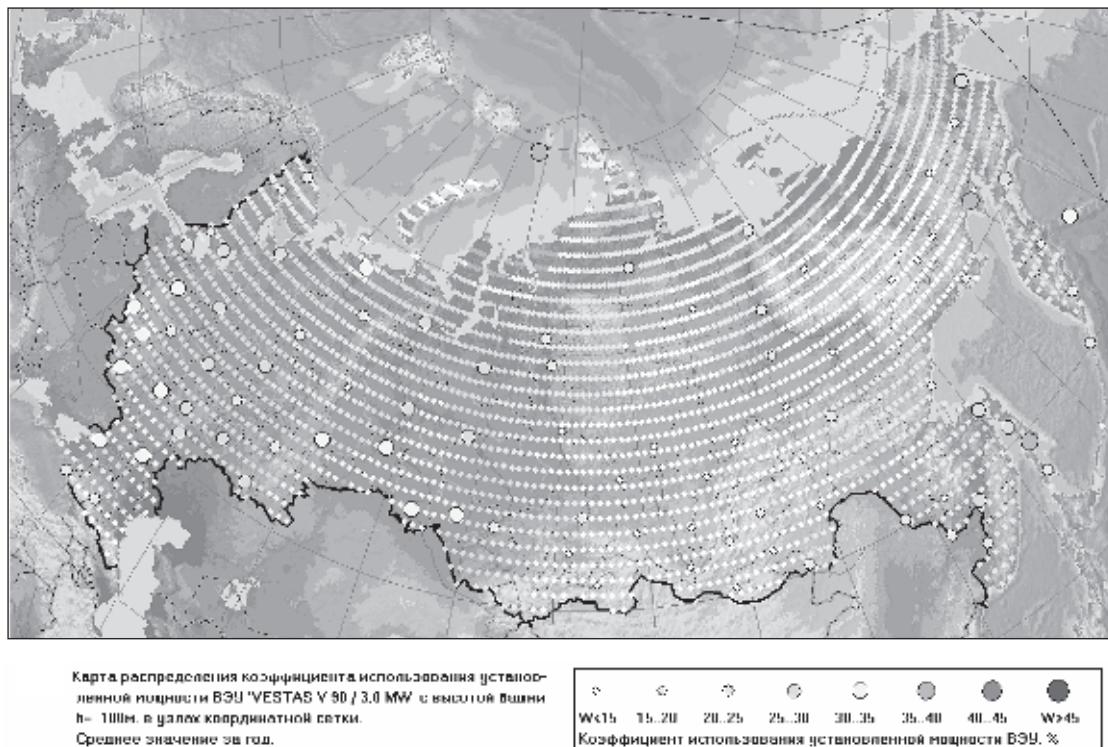


Рис. 6. Распределение среднегодовых коэффициентов использования номинальной мощности $K_{\text{иум}}$ для ВЭУ VESTAS V 90 с высотой башни 100 м

Таблица 2

Технический и экономический потенциал ВЭР по федеральным округам РФ

Федеральный округ	Технический потенциал, чил. кВт·ч/год	Экономический потенциал, чил. кВт·ч/год
Центральный	588	2,94
Северо-западный	1428	7,15
Южный	564	2,82
Приволжский	872,8	4,37
Уральский	1 577	7,54
Сибирский	2 754	13,75
Дальневосточный	3 689	18,45
ИТОГО:	11 473	55,23

экономических обоснований ветроэнергетических проектов в различных регионах России и стран СНГ.

Высокая точность представленной в статье теоретической (не требующей дорогостоящих и длительных дополнительных измерений) методики прогноза энергетических показателей ВЭУ большинства известных типов при ее ма-

лой трудоемкости и стоимости, а также широкие возможности проведения в сжатые сроки многовариантных расчетов энергетической и экономической эффективности ВЭС в любом пункте или регионе на территории России и постсоветского зарубежья позволяют кардинальным образом повысить эффективность проектных ветроэнергетических изысканий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев, В.Г. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения [Текст] / В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов // Атмограф.— М., 2008.
2. Николаев, В.Г. Об эффективности методик прогноза ВЭП, энергетических и экономических показателей ВЭС в РФ [Текст] / В.Г. Николаев / НИИЭС // Малая энергетика. 2010. № 1.
3. Старков, А.Н. Атлас ветров России [Текст] / А.Н. Старков, Л. Лансберг, П.П. Безрукых,
- М.М. Борисенко.— М.: Можайск-Терра, 2000.
4. Безрукых, П.П. Справочник по ресурсам ВИЭ РФ и местным видам топлива [Текст] / П.П. Безрукых, В.В. Дегтярев, В.В. Елистратов [и др].— М.: ИАЦ Энергия, 2007.
5. Васильев, Ю.С. Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России [Текст]: Учебно-справочное пособие [Текст] / Ю.С. Васильев, П.П. Безрукых, В.В. Елистратов, Г.И. Сидоренко.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. — 250 с.

УДК 621.438.082: 621.311.23

Г.А. Ромахова, Д.А. Трецев

ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА НА ПАРОГАЗОВЫХ И ГАЗОТУРБИННЫХ ТЭЦ

Энергетической стратегией России на период до 2030 года предусматривается создание и широкое внедрение комплекса технологического оборудования на модульном принципе для нового строительства источников теплоснабжения и перевода существующих на когенераци-

онную основу. Для централизованного теплоснабжения предполагается использовать в основном парогазовые технологии [1].

По состоянию на конец 2009 года в России эксплуатируется, строится и проектируется более 70 парогазовых блоков суммарной мощнос-



тью свыше 31 ГВт [6]. Широкий спектр газотурбинных установок, представленных на мировом рынке, позволяет проектировать теплофикационные парогазовые блоки различной мощности и эффективности.

Проблема выбора газотурбинной установки, параметров и структуры утилизационного контура для теплофикационных парогазовых установок — более сложная задача, чем для конденсационных, ввиду отсутствия для них общепринятого достоверного критерия термической эффективности. В качестве такого критерия мог бы использоваться эксергетический коэффициент полезного действия, однако он не является явной функцией параметров установки.

Можно показать, что при системном подходе к оптимизации парогазовых теплофикационных установок в качестве критерия может использоваться относительная экономия теплоты топлива по сравнению с раздельной выработкой $\overline{\Delta Q}_{mon}$ и связанный с ней коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении u . Параметр $\overline{\Delta Q}_{mon}$ может использоваться так же, как и коэффициент полезного действия при оптимизации конденсационных установок.

Методология и концептуальные понятия системных исследований в энергетике, а также общие принципы оптимизации энергетических установок на этой базе разработаны в монографиях [2, 4, 5 и др.]. При системном подходе сложная задача оптимизации параметров энергетической установки решается путем построения иерархии задач с соответствующей иерархией целей и критериев. Иерархические уровни связаны между собой прямыми и обратными связями, которые уточняются в процессе решения задачи.

В современных рыночных условиях критерий эффективности установки на самом верхнем иерархическом уровне может служить максимум интегрального эффекта [7]

$$\mathcal{E} = - \sum_{t=0}^T K_t / (1 + E_h)^t + \sum_{t=0}^T \text{ЧД}_t / (1 + E_h)^t \geq 0, \quad (1)$$

где K_t — инвестиции (капитальные вложения) года t ; T — срок службы установки; E_h — норма дисконта; ЧД_t — чистый доход года t , $\text{ЧД}_t = \text{РП}_t - I_t$; РП_t — объем реализованной продукции года t ; I_t —

ежегодные издержки, включающие налоги на прибыль и на имущество, без учета амортизационных отчислений.

Для решения частных задач на более низких уровнях иерархии из критерия (1) могут быть получены частные критерии оптимизации. При выполнении требований по выпуску заданного объема продукции и ограничений на условия сооружения и функционирования установки максимум интегрального эффекта (1) соответствует минимуму приведенных затрат Z [3]:

$$Z = \sum_{t=0}^T K_t / (1 + E_h)^t + \sum_{t=0}^T I_t / (1 + E_h)^t \rightarrow \min. \quad (2)$$

Сравнивая приведенные затраты при комбинированной и раздельной выработке, условие (2) можно записать в относительном виде:

$$\begin{aligned} \Delta Z = & \sum_{t=0}^T \Delta K_t / (1 + E_h)^t + \\ & + \sum_{t=0}^T \Delta I_t / (1 + E_h)^t \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (3)$$

где ΔZ — изменение приведенных затрат по сравнению с базовым вариантом (раздельная выработка); ΔK_t — изменение капитальных вложений; ΔI_t — экономия ежегодных издержек за счет увеличения эффективности по сравнению с базовым вариантом.

При оптимизации параметров и структуры утилизационного контура парогазовой установки основное влияние на изменение приведенных затрат оказывает топливная составляющая ΔI_t , а следовательно, и прямо пропорциональная ей экономия топлива по сравнению с базовым вариантом $\overline{\Delta Q}_{mon}$. Изменения в структуре схемы не приводят к существенному изменению капитальных вложений в строительство станции. Минимум приведенных затрат примерно соответствует максимуму относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой. При оптимизации конденсационных установок такую же роль играет коэффициент полезного действия. Под структурой утилизационного контура здесь понимается совокупность элементов и связей, определяющих его тепловую схему (количество уровней давления пара, наличие или отсутствие промежуточного перегрева, число сетевых подогревателей и т. д.).

Для того чтобы выявить основные параметры, определяющие величину относительной экономии топлива, рассмотрим балансы энергии при комбинированной и раздельной выработке (рис. 1, а, б). Основным условием сравнения служит равенство производимых продуктов: электроэнергии и теплоты, т. е. $N_e = \text{idem}$ и $Q_t = \text{idem}$.

Расход теплоты топлива при комбинированной выработке составит

$$Q_{\text{топ}} = N_e + Q_t + \sum_i Q_i = \frac{N_e + Q_t}{\eta_{\text{ИТТ}}}, \quad (8)$$

где $\sum_i Q_i$ — потери теплоты в установке;

$\eta_{\text{ИТТ}} = 1 - \frac{\sum_i Q_i}{Q_{\text{топ}}}$ — коэффициент использования теплоты топлива.

При раздельной выработке количество теплоты топлива представляет собой сумму

$$Q_{\text{топ}}^{\text{КЭС}} + Q_{\text{топ}}^{\text{ВК}} =$$

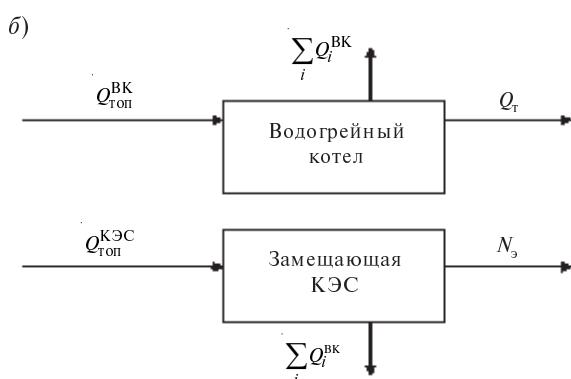
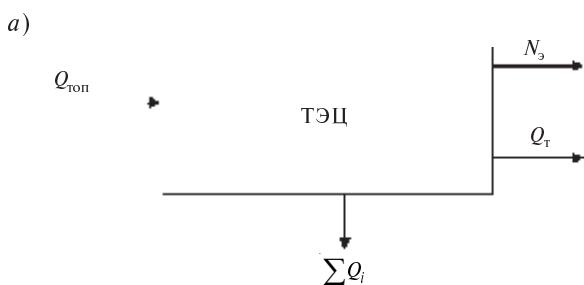


Рис. 1. Энергетические балансы:
а — для теплофикационной установки;
б — при раздельном способе производства
энергии

$$= N_e + \sum_i Q_i^{\text{КЭС}} + Q_t + \sum_i Q_i^{\text{ВК}} = \frac{N_e}{\eta_{\text{КЭС}}} + \frac{Q_t}{\eta_{\text{ВК}}}, \quad (9)$$

где $\sum_i Q_i^{\text{ВК}}$, $\sum_i Q_i^{\text{КЭС}}$ — потери теплоты топлива соответственно в водогрейной котельной и замещаемой КЭС; $\eta_{\text{КЭС}}$ — КПД замещаемой КЭС; $\eta_{\text{ВК}}$ — КПД водогрейной котельной.

Вычитая из соотношения (9) выражение (8) и относя разность к количеству теплоты при раздельной выработке, можно получить

$$\begin{aligned} \overline{\Delta Q}_{\text{топ}} &= 1 - \frac{Q_{\text{топ}}}{Q_{\text{топ}}^{\text{ВК}} + Q_{\text{топ}}^{\text{КЭС}}} = \\ &= 1 - \frac{\frac{N_e + Q_t}{\eta_{\text{ИТТ}}}}{\frac{N_e}{\eta_{\text{КЭС}}} \left(1 + \frac{Q_t}{N_e} \frac{\eta_{\text{КЭС}}}{\eta_{\text{ВК}}} \right)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Учитывая, что отношение выработанной электрической энергии к произведенной в установке теплоте представляет собой удельную выработку электроэнергии на тепловом потребле-

нии $y = \frac{N_e}{Q_t}$, получим:

$$\overline{\Delta Q}_{\text{топ}} = 1 - \frac{\frac{\eta_{\text{КЭС}}}{\eta_{\text{ИТТ}}} \left(1 + \frac{1}{y} \right)}{1 + \frac{1 - \frac{\eta_{\text{КЭС}}}{\eta_{\text{ВК}}}}{y}}. \quad (11)$$

Основными параметрами, влияющими на величину относительной экономии топлива, как следует из полученного соотношения, являются: коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении y , коэффициент полезного действия замещаемой (базовой) конденсационной электростанции $\eta_{\text{КЭС}}$ и коэффициент использования теплоты топлива $\eta_{\text{ИТТ}}$.

Величина $\eta_{\text{ИТТ}}$ зависит в основном от температуры уходящих газов, коэффициента избытка воздуха в них и от величины вентиляционного пропуска пара в конденсатор паровой турбины. На режимах работы по тепловому графику эту величину стремятся снизить до нуля. У современных теплофикационных парогазовых и газотурбинных установок коэффициент использования теплоты топлива находится в достаточно узких пределах и составляет 0,86–0,90.



Коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении y зависит от параметров как газотурбинного, так и утилизационного контуров парогазовой установки. Он может служить критерием на уровне оптимизации параметров теплофикационной установки.

Для того чтобы выявить зависимость $\bar{Q}_{\text{топ}}$ от y и $\eta_{\text{КЭС}}$, необходимо взять производные по этим параметрам.

Производная $\frac{\partial \bar{Q}_{\text{топ}}}{\partial y}$ всегда положительна:

$$\frac{\partial \bar{Q}_{\text{топ}}}{\partial y} \approx \frac{A(1-A)}{(y+A)^2} > 0, \quad (12)$$

где $A = \frac{\eta_{\text{КЭС}}}{\eta_{\text{ВК}}}$, $A < 1$.

При дифференцировании было принято, что $\eta_{\text{ИТТ}} = \eta_{\text{ВК}}$. Это допущение позволяет получить наглядное выражение и не приводит к качественному изменению результата.

Положительное значение производной (12) означает, что чем выше удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении, тем больше относительная экономия топлива по сравнению с раздельной выработкой.

Производная $\frac{\partial \bar{Q}_{\text{топ}}}{\partial \eta_{\text{КЭС}}}$ всегда отрицательна:

$$\frac{\partial \bar{Q}_{\text{топ}}}{\partial \eta_{\text{КЭС}}} \approx -\frac{1+y}{\left(1+\frac{1}{y} \frac{\eta_{\text{КЭС}}}{\eta_{\text{ВК}}}\right)^2}. \quad (13)$$

Следовательно, чем выше эффективность базовой конденсационной электростанции $\eta_{\text{КЭС}}$, тем ниже экономия топлива при комбинированной выработке.

Полученные результаты не зависят от типа базовой электростанции, паротурбинная она или парогазовая. Общее требование к базовой КЭС — равенство количества электроэнергии, производимой ею и рассматриваемой установкой, ее режим работы (базовый, полупиковый), тип топлива. В качестве базовой установки, если ставится задача выявления оптимальной доли теплофикационных парогазовых установок в мощной энергосистеме, целесообразно рас-

матривать серийную, наиболее распространенную. Если решается вопрос о целесообразности комбинированной выработки электроэнергии на конкретной ТЭЦ, базовой установкой может служить конденсационная парогазовая.

Если в качестве базовых установок рассматривать серийные блоки на сверхкритические параметры пара (типа К-300-240), имеющие в условиях эксплуатации КПД порядка 40 %, то экономия топлива при использовании теплофикационных парогазовых установок в энергосистеме составит 37–38 % в зависимости от типа ГТУ и структуры утилизационного контура (рис. 2). По величине коэффициента выработки электроэнергии на тепловом потреблении график на рис. 2 может быть разбит на отдельные зоны. Диапазон $y < 0,7$ характерен для теплофикационных паротурбинных установок. К этому же диапазону относятся и теплофикационные ГТУ. Условная зона теплофикационных парогазовых установок на графике соответствует значениям $1,1 < y < 1,4$. Причем левая граница относится к парогазовым установкам с паровым контуром одного давления, а правая — к установкам с паровым контуром трех давлений и промежуточным перегревом. Показатели всех установок, соответствующих линии $\eta_{\text{КЭС}} = \text{const}$, могут сравниваться между собой, так как экономия топлива при их использовании отнесена к единой базе.

Цифрой 2 на графике отмечены показатели наиболее распространенной в России теплофикационной установки на базе В94.2 (ГТЭ-160) с паровым контуром двух давлений. Экономия топлива при ее использовании в энергосистеме по сравнению с раздельной выработкой составляет 37,7 %, а по сравнению с серийным блоком теплофикационным блоком Т-250-240 — около 10 %.

Теплофикационные ГТУ имеют относительно небольшую экономию топлива по сравнению с паротурбинными теплофикационными блоками (менее 1 %). Они могут работать с тем же коэффициентом теплофикации и обладают более низкими удельными капитальными вложениями. Однако, как правило, это установки небольшой электрической мощности. Применение теплофикационных ГТУ большой мощности, а также строительство мощных ТЭЦ на базе газотурбинных установок небольшой мощности требует специального обоснования.

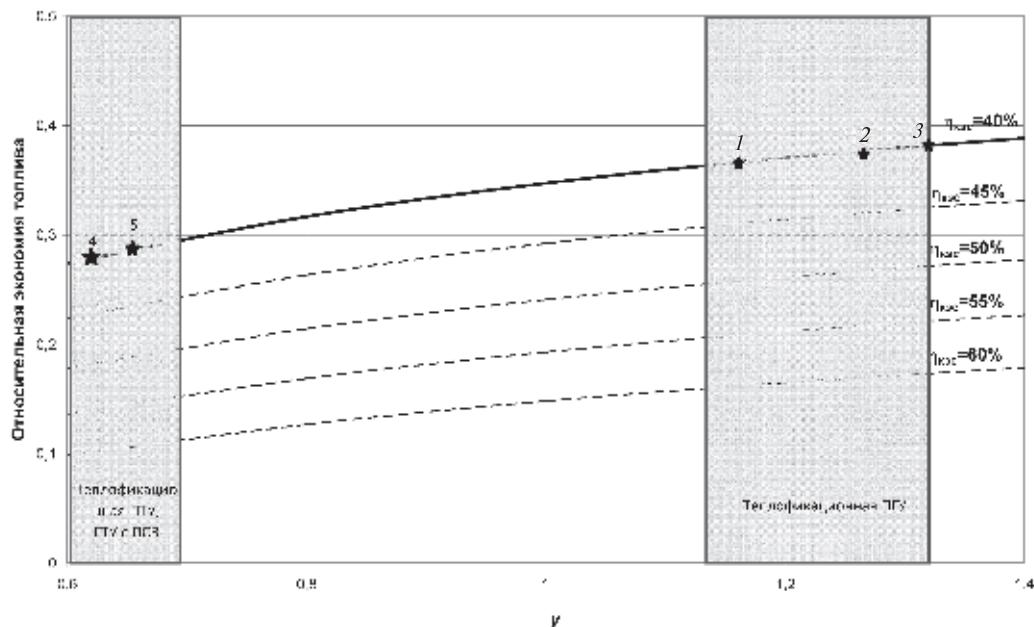


Рис. 2. Влияние коэффициента выработки электроэнергии на тепловом потреблении на относительную экономию топлива в теплофикационных установках различного типа ($\eta_{итт} = 86\%$):

1 — ПГУ на базе V94.2 с паровым контуром одного давления;
2 — ПГУ на базе V94.2 с паровым контуром двух давлений; 3 — ПГУ на базе V94.3A с промежуточным перегревом пара; 4 — Т-250-240; 5 — ГТУ с ПСВ)

С повышением эффективности базовых конденсационных станций в результате совершенствования паротурбинных установок и ввода в эксплуатацию новых парогазовых установок с КПД на уровне 55–60 % экономия топлива в результате комбинированной выработки энергии будет снижаться. Но даже при увеличении КПД базовых КЭС до уровня 50 % она будет составлять 25–28 %.

В задачах оптимизации параметров теплофикационных парогазовых установок величина относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой энергии может использоваться так же, как в задачах оптимизации конденсационных установок применяется коэффициент полезного действия.

Как и для теплофикационных паротурбинных установок, эффект от использования теплофикационных парогазовых установок в энер-

госистемах тем больше, чем выше коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении и чем ниже эффективность базовых конденсационных блоков.

Применение парогазовых ТЭЦ обеспечивает экономию топлива 35–40 % по сравнению с раздельной выработкой энергии при КПД базовых блоков на уровне 40 %.

По сравнению с серийными теплофикационными блоками они обеспечивают экономию топлива на уровне 10 %. Примерно такая же экономия топлива достигается и по сравнению с газотурбинными ТЭЦ.

Экономия топлива от комбинированной выработки энергии в теплофикационных ПГУ будет снижаться по мере повышения КПД конденсационных электростанций. При КПД базовых КЭС на уровне 50 % экономия топлива по-прежнему будет составлять значительную величину на уровне 25–28 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Текст] // Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.



2. Попырин, Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок [Текст] / Л.С. Попырин.— М.: Энергия, 1978.— 416 с.

3. Малинина, Т.В. Экономика отраслей топливно-энергетического хозяйства [Текст]: учебное пособие / Т.В. Малинина, В.А. Таратин.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005.— 127 с.

4. Мелентьев, Л.А. Избранные труды: Методология системных исследований в энергетике [Текст] / Л.А. Мелентьев // Сост. Г.М. Беляева, Л. С. Попырин.— М.: Наука. Физматлит, 1995.— 302 с.

5. Системные исследования проблем энергетики [Текст] / Под. ред. Н.И. Воропая.— Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 2000.— 558 с.

6. Основное оборудование строящихся и действующих ПГУ. Газотурбинные технологии [Текст]: Каталог газотурбинного оборудования.— 2009.— С. 135—142.

7. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [Текст]: вторая редакция / М-во экон. РФ, М-во фин. РФ, ГК по стр-ву, архит. и жил. политике.— М.: Изд-во «Экономика», 2000.— 421с.

УДК 621.311.22:621.577.42

М.А. Молодкина

ТЕПЛОВОЙ НАСОС В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

В процессе эксплуатации для надежной и бесперебойной работы электрогенераторов необходимо обеспечивать надлежащий отвод выделяющейся теплоты. В частности, для турбогенератора с воздушным охлаждением ТЗФГ-160-2МУ3 номинальная температура холодного воздуха внутри корпуса составляет 40 °C, соответственно при превышении температуры мощность генератора должна быть уменьшена до величины, при которой температуры обмоток статора и ротора, а также сердечника статора не будут превышать наибольшие допустимые в эксплуатации значения. Если при разгрузке генератора температура холодного воздуха не снижается до 50 °C, его следует отключить от сети не более чем через 5 минут после поступления сигнала.

С ростом мощности электрических машин условия отвода теплоты ухудшаются, соответственно возникает необходимость применения достаточно интенсивных способов охлаждения [2].

На рис. 1 представлена упрощенная схема системы охлаждения генератора ТЗФГ-160-2МУ3. Воздух, циркулирующий в генераторе, охлаждается четырьмя воздухоохладителями (ВО), расположенными по бокам корпуса статора; отвод теплоты от них производится обессоленной водой, циркулирующей по замкнутому контуру. Обессолененная вода охлаждается технической во-

дой в водоводяном теплообменнике (ВВТО) типа МЗО-FG фирмы Alfa Laval. Схема предусматривает возможность перехода на разомкнутый цикл охлаждения с подачей технической воды непосредственно в воздухоохладитель.

Один из серьезных недостатков существующей схемы — существенное влияние технической воды невысокого качества на режим отвода теплоты от генератора. При повышении темпе-

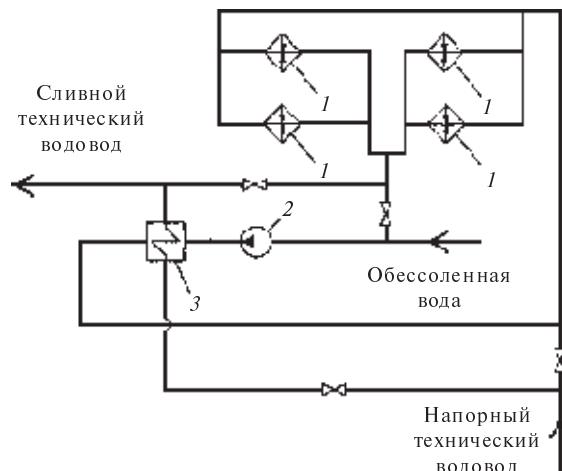


Рис. 1. Схема охлаждения генератора:
1 — воздухоохладитель генератора; 2 — насос замкнутого контура системы охлаждения генератора; 3 — водоводяной теплообменник

ратуры охлаждающей обессоленной воды на входе в воздухоохладитель вследствие ухудшения теплообмена в ВВТО контур охлаждающей воздухоохладитель воды размыкается, обессоленная вода направляется на слив, водоводяной теплообменник выводится в ремонт, а в воздухоохладители направляется техническая вода. В конечном счете низкое качество технической воды приводит к необходимости вывода в ремонт воздухоохладителей, а поскольку длительность работы генератора при одном отключенном ВО допускается не более 24 часов при нагрузке не выше 75 % от номинальной, а при отключении более одного воздухоохладителя запрещается вовсе, то под угрозой оказываются надежность и бесперебойность работы электрогенератора.

В то же время система охлаждения генератора может рассматриваться как источник низкопотенциальной теплоты (ИНТ), сбрасываемой вместе с технической водой в градирню. В табл. 1 представлены результаты расчета количества низкопотенциальной теплоты, теряемого в одном воздухоохладителе и в целом в системе охлаждения генератора (расчет произведен для генератора ТЭФГ-160-2МУЗ).

Для утилизации выбросов низкопотенциальной теплоты из системы охлаждения генератора предлагается в уже существующую схему внести следующие изменения, отраженные на рис. 2. По-

ток охлаждающей ВО обессоленной воды следует направить в испаритель теплового насоса (ТН), где, охлаждаясь до нормативной температуры, он будет отдавать теплоту хладоагенту, после чего, достигнув номинальных параметров, поступит непосредственно в воздухоохладители генератора. Хладоагент будет подаваться после испарителя в приводимый в действие двигателем компрессор ТН, где его параметры будут повышаться, затем в конденсатор ТН, с отдачей здесь теплоты, после чего хладоагент подвергается дросселированию до первоначальных параметров. Предусмотрена также возможность полного или частичного возвращения к первоначальной схеме охлаждения генератора при возникновении необходимости вывода в ремонт теплонасосной установки.

К достоинствам предложенной схемы можно отнести:

возможность применения для аналогичных турбогенераторов, установленных на любых тепловых электростанциях;

отсутствие прямой взаимосвязи с основной тепловой схемой ТЭС за исключением линии подпитки контура обессоленной воды;

отсутствие непосредственного влияния на режимы работы основного и вспомогательного оборудования ТЭС (резервное охлаждение обессоленной воды может происходить в водоводяном теплообменнике);

Таблица 1

Расчет потерь низкопотенциальной теплоты в системе охлаждения генератора

Название параметра	Единицы измерения	Значение параметра
Максимальное количество охлаждающей воды перед НО	М3/ч	0,6
Номинальная температура охлаждающей воды перед НО	°C	28
Эпизодическая охлаждающей воды перед НО	кДж/кг	117,93
Расход охлаждающей воды перед НО	м ³ /ч	22,5
Температура охлаждающей воды после НО	°C	34,5
Эпизодическая охлаждающей воды после НО	кДж/кг	145,09
Номинальная температура охлаждающего воздуха за выходом из НО	°C	40
Номинальная температура охлаждающего воздуха за входом в НО	°C	80
Инфармация теплоемкость воды	кДж/кг	4,18
Инфармация теплоемкость воздуха	кДж/кг	1,01
Темпера, стоящая оптим. воздухоохладителем	кН	615
Низкопотенциальная теплота, теряемая в системе охлаждения генератора	кН	2460
Низкопотенциальная теплота, теряемая в системе охлаждения генератора, переходящая в условия тогтн	кг. у. т./ч	302,2



Рис. 2. Схема включения теплового насоса в схему охлаждения генератора:

1 — воздухоохладитель генератора; 2 — насос замкнутого контура системы охлаждения генератора; 3 — конденсатор ТН; 4 — компрессор ТН; 5 — испаритель ТН; 6 — дроссель; 7 — привод компрессора; 8 — водоводяной теплообменник для резервирования охлаждения обессоленной воды

отсутствие влияния качества технической воды на работу предложенной схемы охлаждения генератора;

сокращение количества потребляемой технической воды;

выработку дополнительного количества высокопотенциальной теплоты, которая может как использоваться на собственные нужды ТЭС, так и отпускаться внешнему потребителю.

Недостатки схемы:

необходимость подачи электроэнергии на привод компрессора ТН, а следовательно, снижение полезного отпуска электроэнергии от ТЭС;

прямая зависимость от изменения электрической нагрузки и вместе с тем полное отсутствие влияния на режимы работы основного оборудования ТЭС, что в целом снижает маневренность теплонасосной установки (ТНУ).

На основании данных, приведенных в табл. 1, были рассчитаны характеристики теплового насоса, способного утилизировать низкопотенциальную теплоту, теряемую в системе охлаждения генератора ТЗФГ-160-2МУ3, для двух различных режимов работы конденсатора ТНУ:

1) температуры теплоприемника на входе и выходе из конденсатора ТН приняты равными

$T_{\text{вх}}^{\text{K}} = 60^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{вых}}^{\text{K}} = 80^{\circ}\text{C}$ (предполагается даль-

нейшее использование теплоприемника для отопления);

2) температуры теплоприемника на входе и выходе из конденсатора ТН приняты равными $T_{\text{вх}}^{\text{K}} = 50^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{вых}}^{\text{K}} = 70^{\circ}\text{C}$ (предполагается возможность использования теплоприемника для горячего водоснабжения).

Для расчета теплового насоса принимались следующие параметры:

температуры ИНТ на входе в испаритель ТН $T_{\text{вход}}^{\text{ИНТ}} = 34,5^{\circ}\text{C}$ (расчетная температура, соответствующая нормативному теплосъему в воздухоохладителе при обеспечении минимального допустимого расхода охлаждающей воды);

температура ИНТ на выходе из испарителя ТН $T_{\text{выход}}^{\text{ИНТ}} = 28^{\circ}\text{C}$ (номинальная температура охлаждающей воды перед ВО);

расход ИНТ $G_{\text{инт}} = 324 \text{ м}^3/\text{ч} = 90 \text{ кг}/\text{с}$ (минимально допустимый расход охлаждающей воды);

рабочий агент — фреон R11 (выбран исходя из его термодинамических свойств [1]);

минимальные разности температур между греющей и нагреваемой средами в испарителе ΔT^{u} , конденсаторе ΔT^{k} приняты одинаковыми ($\Delta T^{\text{u}} = \Delta T^{\text{k}} = 5^{\circ}\text{C}$);

внутренний относительный КПД компрессора — $\eta_i = 0,8$.

В табл. 2 приведены результаты расчета характеристик теплового насоса для различных направлений использования теплоприемника.

Расчеты показали, что наиболее эффективен с точки зрения коэффициента преобразования энергии и расхода приемника низкопотенциальной теплоты режим работы конденсатора теплового насоса 50/70, предусматривающий использование теплоприемника для горячего водоснабжения, причем не только на собственные нужды ТЭС, но и для отпуска стороннему потребителю (параметры и расход теплоприемника — это позволяют).

Поскольку нагрузка систем горячего водоснабжения в течении суток колеблется в значительных пределах, существенным препятствием для работы теплового насоса в наиболее эффективном из двух рассмотренных режимов является невысокая маневренность теплонасосной установки, связанная с необходимостью непрерывного поддержания режима охлаждения генератора.

Для регулирования количества теплоты, отпускаемого от теплонасосной установки, а также для снижения влияния на него электрической нагрузки генератора и, таким образом, для повышения маневренности ТНУ схемой предусмотрен режим работы ТН + ВВТО, предполагающий возможность перераспределения расходов обессоленной воды между испарителем теплового насоса и водоводяным теплообменником, охлаждаемым технической водой.

К достоинствам предложенного совместного режима работы можно отнести:

повышение маневренности теплонасосной установки;

снижение электрической мощности, потребляемой компрессором ТНУ;

резервирование системы охлаждения генератора.

Недостатки режима работы ТН + ВВТО:
влияние на работу системы охлаждения качества технической воды;

безвозвратные потери части выделяющейся низкопотенциальной теплоты стехнической водой.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Один из возможных способов энергосбережения на тепловой электростанции — вовлечение теплового насоса в схему охлаждения генератора с целью утилизации части низкопотенциальной теплоты, сбрасываемой в градирню. При этом также появляется возможность ликвидировать отрицательное влияние, оказываемое невысоким качеством технической воды на режим отвода теплоты от генератора, и сократить потребление технической воды.

2. Применение теплового насоса в системе охлаждения генератора не потребует значительных изменений в уже существующей схеме. Для обеспечения эффективного перепада температур между приемником низкопотенциальной теплоты и ее источником необходимо будет лишь снизить расход обессоленной воды, циркулирующей в воздухоохладителе генератора, до минимально допустимого значения.

3. Небольшие затраты электроэнергии на привод компрессора теплонасосной установки

Таблица 2

**Расчет характеристик теплового насоса,
используемого в схеме охлаждения генератора**

Параметры	Единицы измерения	Значения параметров в двух режимах работы конденсатора ТН	
		60/80	50/70
Расход рабочей жидкости	кг/с	19,5	18,2
Расход пресной воды	кг/с	38,7	36,9
Нагрузка конденсатора ТН	кВт	3245	3085
Нагрузка испарителя ТН	кВт	2444	2444
Электрическая мощность компрессора	кВт	1000	801
Коэффициент трансформации	—	3,2	3,9



наряду с отсутствием прямой взаимосвязи с основной тепловой схемой ТЭС (за исключением линии подпитки контура обессоленной воды) являются преимуществами данной схемы по сравнению с утилизацией низкопотенциальной теплоты обратной сетевой воды и технической воды, охлаждающей конденсатор паровой турбины в обход градирни.

4. Особенность предложенного варианта применения теплового насоса на тепловых электростанциях — прямая зависимость режима работы теплонасосной установки от электрической нагрузки генератора.

5. Наиболее эффективным с точки зрения коэффициента преобразования энергии и расхода

приемника низкопотенциальной теплоты является режим работы конденсатора теплового насоса 50/70, предусматривающий использование теплоизолированного приемника для горячего водоснабжения.

6. Для повышения маневренности ТНУ, применяемой в системе охлаждения генератора, предусмотрен режим работы ТН + ВВТО, предполагающий возможность перераспределения расходов обессоленной воды между испарителем теплового насоса и водоводяным теплообменником, охлаждаемым технической водой.

7. Единообразие замкнутых систем воздушного охлаждения для турбогенераторов позволяет применять исследованную схему на любых тепловых электростанциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боровков, В.М.** Эффективность применения тепловых насосов на тепловых электростанциях с парогазовыми установками [Текст]: учебное пособие / В.М. Боровков, А. Аль-Алавин.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 264 с.

2. **Вольдек, А.Н.** Электрические машины [Текст]

/ А.Н. Вольдек.— Л.: Энергия, 1978.— 832 с.

3. **Соколов, Е.Я.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения [Текст]: учебное пособие / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоиздат, 1981.— 320 с.

УДК 620.92; 620.9:662.62; 620.9:662.92

M.C. Bass

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЕКТОВ (на примере Забайкальского края)

По оценкам, принятым в «Энергетической стратегии России на период до 2020 года», утвержденной распоряжением № 1234-р Правительства Российской Федерации от 28 августа 2003 года, существующий потенциал энергосбережения составляет 360–430 млн т у.т., или 39–47 % текущего внутреннего потребления первичной энергии. Почти третья часть его сосредоточена в отраслях ТЭК (в том числе четверть — в электроэнергетике и теплоснабжении), еще 35–37 % — в промышленности и 25–27 % — в жилищно-коммунальном хозяйстве.

Чтобы оценить эффективность использования тепловой энергии необходимо рассматривать весь комплекс — источники, тепловые сети

и потребители, как в совокупности, так и по отдельности. Каждый объект данного комплекса имеет свой потенциал энергосбережения, эффективность его работы влияет и на остальные составляющие.

Существуют два основных источника централизованного теплоснабжения — котельные и ТЭС.

Тепловые электрические станции представляют собой достаточно совершенное производство, отвечающее технологическому уровню времени их постройки. Разумеется, большинство станций морально и физически устарело, и требуется их серьезная модернизация или введение новых мощностей.

Наиболее сложная ситуация сложилась в котельных, работающих на углях, особенно на объектах, находящихся на балансе муниципальных образований. Отсутствует достоверная информация о типах котлов, их паспортных характеристиках, не говоря уже о фактическом состоянии оборудования (что можно оценить только после режимных испытаний).

Разработана упрощенная методика расчета нормативов удельных расходов топлива по отопительным котельным Забайкальского края [1]. Она позволяет с достаточно высокой точностью без проведения режимно-наладочных работ определить средневзвешенный норматив удельного расхода топлива для котельной в условиях Забайкальского края исходя только из вида топлива, количества котлоагрегатов, годового отпуска тепла и установленной мощности котельной или котлоагрегатов. Причем весь расчет легко автоматизировать. Предлагаемая методика хорошо подходит для предварительной оценки характеристик котельных, находящихся на балансе предприятий, административных районов и региона в целом. Кроме того, полученные зависимости могут быть использованы при комплексном исследовании систем централизованного теплоснабжения, а также для оценки годовых эффектов от внедрения энергосберегающих мероприятий как на котельных и тепловых сетях, так и у потребителей тепловой энергии. Методика легко адаптируется под условия любого региона.

В Забайкальском крае в различных отраслях и ведомствах по данным Забайкалкрайстат [2] эксплуатируется 1107 котельных тепловой мощностью от 0,5 до 20 Гкал/ч. Кроме того, более 22 котельных имеют теплопроизводительность выше 20 Гкал. На котельных установлено 2701 котлоагрегат. Доля потребления бурого угля 98,15 % (6 878 769 т), а каменного — 1,85 % (129645 т).

Проведенные обследования большого числа котельных выявили, что реальный их КПД лежит в пределах 49–64 % при норме 70–75 %. Для предварительного установления причин низкой экономичности работы котельного агрегата возьмем 1 котел мощностью $Q = 1,16 \text{ МВт}$ (1 Гкал/ч), работающий на харанорском угле с теплотой сгорания $Q_p^H = 11467 \text{ кДж/кг} \approx 2730 \text{ ккал/кг}$ с паспортным КПД 75 %. Цена топлива 700 руб./т.

Если фактический КПД (после испытания) составляет 60 %, то документально необоснованный пережог топлива будет 87,4 т в месяц или свыше 60 тыс. руб в месяц с одного котла:

$$\Delta B = \frac{Q}{\Delta \eta_K Q_p^H} \frac{1,16 \cdot 10^6}{0,15 \cdot 11,467 \cdot 10^6} = \\ = 0,135 \text{ кг/с} \approx 87,4 \text{ т/мес.}$$

Основные выявленные недостатки работы котлоагрегатов

1. Ни один котел не несет номинальную нагрузку (нагрузка меньше на 30–90 %).

2. У всех котлов на всех режимах завышены расходы воздуха, что приводит к снижению нагрузки и к увеличению потерь с уходящими газами.

3. По причине неудовлетворительного режима горения наряду с повышенным расходом воздуха фиксировались значительные концентрации моноксида углерода. С одной стороны, воздуха много, а с другой, его не хватает для полного сгорания топлива по причине плохого перемешивания.

4. В ряде случаев выявлено неудовлетворительное состояние обмуровок котлов.

5. На некоторых котлах температура уходящих газов превышает допустимые значения, что приводит к существенному снижению КПД. Вместе с тем наблюдались случаи, когда температуры уходящих газов были ниже точки росы (на небольших нагрузках), что служит причиной коррозии хвостовых поверхностей нагрева, газоходов, дымососов и дымовой трубы.

6. Отсутствие топливоподготовки.

7. Отсутствие водоподготовки, что отрицательно сказывается как на поверхностях нагрева котлоагрегатов, так и на состоянии тепловых сетей и внутренних коммуникациях зданий.

Мероприятия по повышению КПД можно условно разделить на режимно-наладочные, реконструкционные и модернизационные. Последние два вида сложно оценить, так как данные работы существенно зависят от конкретного котельного оборудования. Для оценки эффективности работ по наладке котлоагрегатов вначале необходимо определить отпуск тепла с коллекторов котельной, Гкал:



$$Q_{\text{от}} = Q_{\text{янв}}^{\text{ср}} \left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)_{\text{янв}} \tau_{\text{янв}},$$

где $Q_{\text{янв}}^{\text{ср}}$ — средняя нагрузка в январе, Гкал/ч;

$\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)_{\text{янв}}$ — относительный расход, приходя-

щийся на январь; $\tau_{\text{янв}}$ — число часов работы оборудования в январе (744 ч).

Экономия денежных средств при изменении КПД котлоагрегата (в тыс. руб.)

$$\Theta = 419 \Pi_t \cdot \frac{Q_{\text{от}}}{Q_P^H} \left(\frac{1}{\eta_{\text{к а}}^{\text{бр}}} - \frac{1}{(\eta_{\text{к а}}^{\text{бр}})'} \right),$$

где Π_t — стоимость топлива, руб/т; Q_P^H — низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; $\eta_{\text{к а}}^{\text{бр}}$, $(\eta_{\text{к а}}^{\text{бр}})'$ — КПД котла (котельной) до и после внедренных мероприятий, %.

Была произведена оценка режимно-наладочных работ применительно к котлоагрегатам, работающим на буром, каменном углях и на мазуте (принято, что режимно-наладочные работы позволят повысить КПД котла на 5 %. Результаты представлены в табл. 1).

Ориентируясь на данные таблицы, можно сделать вывод, что в первую очередь наиболее выгодны при проведении наладочных работ котлы с большой мощностью.

Чем ниже начальный КПД котла, работающего на одном виде топлива, тем больше эффективность от мероприятий, направленных на повышение экономичности его работы. Скажем, при увеличении КПД на 5 % при начальном его значении 50 % экономия топлива для котла мощностью 1 Гкал/ч будет 71 т у. т./год, при 60 % — 50 тут/год, при 70 % — 37,2 т у. т./год. Т. е. чем хуже изначально работает котел, тем эффективнее проведение мероприятий по повышению его работы.

Котлы одной мощности, работающие на различных видах топлива, имеют различные технико-экономические показатели при внедрении мероприятий, направленных на повышение их КПД: наиболее выгодно внедрять их при работе на мазуте, затем — на буром угле, на последнем месте — на каменном угле. Это связано в основном со стоимостью топлива (самым дорогим является мазут); даже незначительная его экономия приводит к резкому снижению срока окупаемости выполняемых работ. Стоимости же каменного и бурого угля относительно одинаковы, но изначальный КПД котлоагрегатов, работающих на каменном угле, выше.

Современные российские системы централизованного теплоснабжения характеризуются значительными потерями при транспортировке и распределении тепловой энергии. Были проведены тепловые испытания ряда тепловых сетей Забайкальского края. Установлено, что реальные тепловые потери превышают норма-

Таблица 1
Общий ресурс экономии ТЭР на котельных Забайкальского края

Показатели	Ед. измерения	Значения показателей для котельных различной мощности			
		до 3 Гкал/ч	от 3 до 20 Гкал/ч	свыше 20 Гкал/ч	Несмотря
Число источников теплоснабжения	шт	948	159	22	1129
Стоимость наложений работ	тыс. руб	91,9	18,2	2,9	113,0
Суммарная стоимость источников теплоснабжения	Гкал/ч	1131,3	1130,2	865,4	3126,9
Экономия топлива при увеличении КПД на 5 %	тыс. т у. т./год	56,6	56,5	43,3	156,4
Экономия денежных средств при увеличении КПД на 5 %	тыс. руб	108,7	108,6	83,1	300,4
Срок окупаемости	гол	0,846	0,167	0,035	0,376
	месяц	10,15	2,01	0,42	4,51

тивные расчетные на 24–28 %; причем расчетные нормы приняты для периода с 1959 по 1990 год, что уже давно не соответствует современным требованиям, предъявляемым к тепловой изоляции.

Уменьшение потерь тепла — главное средство экономии топлива на пути от источника до потребителя. Опыт эксплуатации тепловых сетей в России показывает, что до 50 % транспортируемой теплоты не доходит до потребителя из-за нарушения теплоизоляции и утечек теплоносителя. После развода СССР практически полностью прекратились плановые замены трубопроводов. Состояние как самих труб, так и тепловой изоляции плачевно. Местами сети могут быть затопленными, кое-где полностью отсутствует изоляция или находится в таком состоянии, когда ни о какой эффективной передаче тепловой энергии нет и речи.

Один из способов улучшения ситуации — восстановление изоляции путем ее замены. Для технико-экономической оценки эффективности мероприятий по замене тепловой изоляции необходима адекватная методика расчета затрат. Наиболее точную методику можно предложить для конкретного региона, имеющего свои климатические и технологические особенности.

Протяженность тепловых и паровых сетей в Забайкальском крае (в двухтрубном исчислении) — 2005,2 км. Из них с условным диаметром до 200 мм — 1505,7 км (75,1 %), от 200 до

400 мм — 333,8 км (16,6 %), от 200 до 600 — 125,3 км (6,3 %), более 600—40,4 км (2 %) [2]. На балансе ведущей энергетической компании региона ОАО — «ТГК-14» находится 84 %.

Для определения оптимального теплоизоляционного материала был разработан программный комплекс по расчету экономическойтолщины изоляции и тепловых потерь теплосетей. В нем были использованы нормативные методы, разработанные Е.П. Шубиным [3], с учетом методики определения затрат при замене теплоизоляции тепловых сетей для условий Забайкальского края [4].

В качестве примера применения данной методики рассмотрим систему теплоснабжения г. Читы, самую крупную в Забайкальском крае. Источники теплоснабжения в ней — ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 ОАО «ТГК-14».

В ходе расчетов были найдены затраты (табл. 2) на приобретение экономически оптимальных количеств теплоизолятора и покрывающего слоя при воздушной и подземной прокладке для различных типов изоляции (ППБ — пенополимербетон; ППУ — пенополиуретан; АПБ — армопенобетон; МВ — минеральная вата; ВП — вспененный полиэтилен; ФП — фенольный поропласт).

На основе расчетов, произведенных с помощью разработанного программного комплекса, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективный и экономичный из выбранных теплоизоляционных материалов — это вспененный

Таблица 2

Экономические показатели замены изоляции в г. Чита

Теплоизоляция	Показатели для разных типов изоляции					
	ППБ	ППУ	АПБ	МВ	ВП	ФП
Физико-химические затраты, тыс. руб.						
ТЭЦ-1 — город	51,434	54,183	44,199	41,837	42,514	50,514
ТЭЦ-1 — КСК	30,370	25,529	24,312	24,312	24,483	28,855
ТЭЦ-2 — город	20,722	21,346	18,155	17,381	17,395	20,249
Итого	102,526	101,058	86,666	83,530	84,393	99,618
Срок окупаемости, лет						
ТЭЦ-1 — город	9,586	9,532	6,91	6,305	6,272	8,855
ТЭЦ-1 — КСК	11,961	9,229	7,683	7,378	7,245	10,416
ТЭЦ-2 — город	12,161	11,338	8,489	7,789	7,596	10,907
Итого	10,67	9,78	7,408	6,868	6,78	9,642
Рентабельность, %	9,373	10,225	13,499	14,561	14,75	10,372



полиэтилен (это подтверждают и выводы по значениям тепловых потерь, а также по прибыли и сроку окупаемости). Ему незначительно уступает минераловатная изоляция. Самым нецелесообразным является теплоизолирующий материал из полимерпенобетона, так как у него самые высокие тепловые потери.

Однако при конечном выборе теплоизоляционного материала следует исходить не только из вышеприведенных факторов, но и учитывать требования, предъявляемые к теплоизоляционным материалам и конструкциям: эксплуатационную надежность и долговечность; пожарную и экологическую безопасность; простоту нанесения на трубопроводы.

Вспененный полиэтилен отвечает почти всем этим требованиям. К его недостаткам можно отнести то, что он, наиболее эффективный при применении уже готовых труб в изоляции, при замене старой изоляции труб оказывается наиболее трудоемким и требует определенной подготовки персонала.

Минераловатная изоляция лишена этих недостатков. Ее главный недостаток — высокое влагопоглощение, но с применением качественного покрывного слоя и при соблюдении всех норм монтажа этот недостаток исчезает.

В ходе проведения энергоаудитов потребителей были выявлены три основные направления внедрения энергосберегающих мероприятий: автоматизация тепловых узлов, замена окон, утепление ограждающих конструкций зданий.

Для оценки эффективности замены элементов ограждающих конструкций предлагается следующая методика:

1. Вначале определяется расчетная нагрузка здания. Для этого можно воспользоваться методикой нахождения расчетной нагрузки отопления здания по его наружному объему [5].

Расчетную нагрузку отопления здания по его наружному объему Q_o , Вт(ккал/ч), вычисляют по формуле

$$Q_o = q_o V (t_b - t_h), \quad (1)$$

где q_o — удельные теплопотери (удельная отопительная характеристика) жилых и общественных зданий при $t_h = -30^{\circ}\text{C}$, $\text{Вт}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ [ккал/(ч·м³·°C)]; V — объем здания по наружному обмеру, м³; t_b — расчетная температура внутреннего воздуха отапливаемых помещений, °C; t_h — расчетная для отопления температура наружного воздуха, °C.

Удельные теплопотери (q_o) жилых и общественных зданий, построенных после 1958 года, для климатических районов с расчетной (для отопления) наружной температурой $t_h = -30^{\circ}\text{C}$ приведены в табл. 3.

Удельные теплопотери жилых и общественных зданий с наружным объемом $V > 3000 \text{ м}^3$ для этого же климатического района могут быть приблизительно определены по эмпирической формуле

$$q_o = \frac{a}{\sqrt[4]{V}}, \quad (2)$$

где V — объем здания по наружному обмеру, м³; a, n — коэффициенты.

Для зданий, построенных до 1958 года, т. е. более утепленных, можно принять $n = 6$; $a = 1,85 \text{ Вт}/(\text{м}^{2,83}\cdot\text{К})$ [1,6 ккал/(м^{2,83}·ч·°C)]; для зданий строительства после 1958 года — $n = 8$; $a = 1,52 \text{ Вт}/(\text{м}^{2,875}\cdot\text{К})$ [1,3 ккал/(м^{2,875}·°C)].

Для районов с другой расчетной температурой для отопления вводятся поправочные коэффициенты β к значениям q_o :

$$\beta = 1,2 \text{ при } t_h \geq -10^{\circ}\text{C};$$

$$\beta = 1,1 \text{ при } t_h = 20^{\circ}\text{C};$$

$$\beta = 0,9 \text{ при } t_h \leq -40^{\circ}\text{C}.$$

На следующем этапе определяется снижение тепловых потерь через ограждающую конструкцию при соответствующей расчетной для отопления температуре наружного воздуха:

Таблица 3

Удельные теплопотери жилых и общественных зданий

Этапность зданий	1	2–3	4–5	6 и более
Удельные теплопотери, $\text{Вт}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ [ккал/(ч·м ³ ·°C)]	0,7–0,8 0,6–0,7	0,47–0,58 0,4–0,5	0,42–0,47 0,36–0,4	0,35–0,41 0,3–0,35

$$\Delta Q = \sum F \left(\frac{1}{R_I} - \frac{1}{R_{II}} \right) (t_B - t_H), \quad (3)$$

где $\sum F$ — сумма площадей заменяемого элемента ограждающей конструкции, m^2 ; R_I, R_{II} — термическое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций соответственно до и после замены, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$.

3. Последним определяется количество тепла, сэкономленного за отопительный сезон.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости относительных тепловых нагрузок $\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} = f(\tau)$ в течение года с учетом и без учета нагрузки горячего водоснабжения (ГВС).

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

$$\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} = \left[\cos^a \left(\frac{\tau - \tau_{\max}}{T} 2\pi \right) + 1 + q_{\text{ГВС}} \right] \frac{Q_{\max}}{2bQ_{\text{год}}}, \quad (4)$$

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

Достаточная точность в случае работы источника теплоснабжения на угле достигается при $a = 3/2$ и $b = 1,35$, а при работе на мазуте — $a = 1,4$ и $b = 1,47$.

Размерность времени может быть любая — месяцы, дни, часы.

Зная снижение тепловых потерь через ограждающую конструкцию, соответствующие ра-

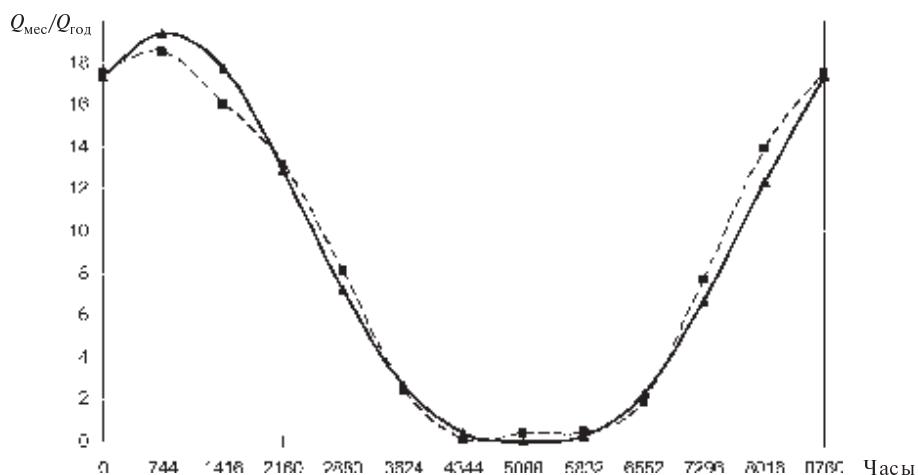


Рис. 1. Зависимость относительной тепловой нагрузки без ГВС в течение года: —■— факт; —— расчет

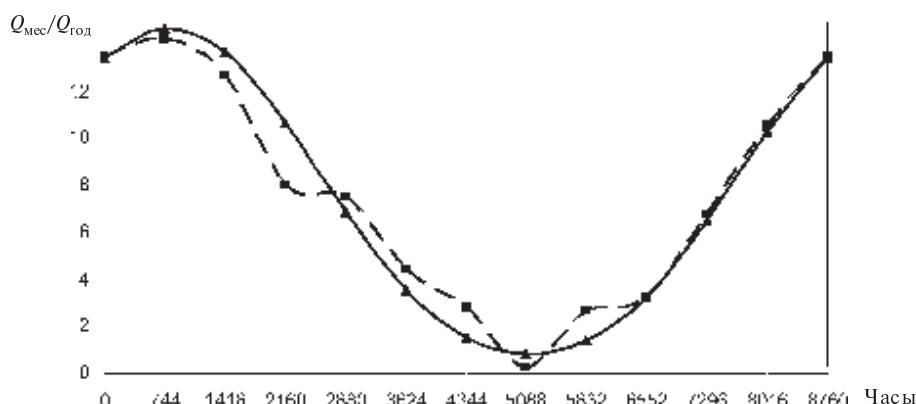


Рис. 2. Зависимость относительной тепловой нагрузки с ГВС в течение года: —■— факт; —— расчет



счетной (для отопления) температуре наружного воздуха можно найти ежемесячные значения от-

$$\text{пуска тепловой энергии: } \Delta Q_{\text{мес}} = \frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \Delta Q.$$

Данные значения суммируются, и получается значение снижения тепловых потерь в течение года.

Зная стоимость 1 Гкал или 1 кВт, легко определить экономию в денежном эквиваленте.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Самое эффективное энергосберегающее мероприятие для Забайкальского края в комплексе котельная — сеть — потребитель — это наладка котельного оборудования; срок его окупаемости составляет 0,4–10 месяцев в зависимости от мощности котлоагрегата.

2. Существующие нормы тепловых потерь в 1,9–4,1 раза превышают фактические их значения при использовании различных типов изоляционных материалов. Реальные годовые тепловые потери превышают минимум в 2,3 раза уровень потерь, если в качестве тепловой изоляции используется пенополимербетон, и максимум в 3,8 раза — если используется вспененный полиэтилен. По полученным тепловым потерям

можно сделать вывод, что наиболее оптимальные теплоизоляционные материалы — это минеральная вата и вспененный полиэтилен. Для них сроки окупаемости проектов по замене теплоизоляции — около 10 лет.

3. Большинство потребителей в системах теплоснабжения России подключены без применения даже гидравлической автоматики. Практика и расчет показывают, что внедрение энергосберегающей автоматики у потребителя — наиболее инвестиционно привлекательно, так как срок окупаемости варьируется от 0,5 до 3 лет в зависимости от тепловой нагрузки (чем больше объект, тем меньше срок окупаемости).

4. Замена окон на стеклопакеты целесообразна как реконструкционное мероприятие для старых зданий и имеет срок окупаемости в среднем 2–4 года.

5. Утепление ограждающих конструкций на существующих зданиях с применением современных вентилируемых фасадов малопривлекательна с точки зрения привлечения финансовых ресурсов, так как имеет большой срок окупаемости — примерно 15–20 лет.

Статья написана по результатам работ в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. О снабжении населения Читинской области теплоэнергией в 2007 году [Текст]: статистический сборник. — Чита: Забайкалкрайстат, 2008.

3. Шубин, Е.П. Материалы, методы, устройства и расчет тепловой изоляции трубопроводов [Текст] / Е.П. Шубин.— М.: Госэнергоиздат, 1948.

4. Басс, М.С. Методика определения затрат при замене теплоизоляции тепловых сетей для условий Забайкальского края [Текст] / М.С. Басс // Научно-технические ведомости СПбГТУ.— 2009. №3.

5. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети [Текст]: Учебник для вузов / Е.Я. Соколов. — 7-е изд., стереот. — М. : Изд-во МЭИ, 2001. — 472 с. : ил.

УДК 621.1

С.А. Требунских, А.Г. Батухтин

ЭНТРОПИЙНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОПОТРЕБЛЯЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

Термодинамическая теория неравновесных процессов преимущественно применяется при изучении процессов с химическими превращениями веществ, однако существенные результа-

ты получены и в направлении информационных процессов. Центральные понятия термодинамики неравновесных процессов — энтропия и производство энтропии. Теория информации также

развивается с применением термина «энтропия», поскольку отмечено совпадение формул для разности статистической энтропии и количества информации. В рамках теории информации появился термин «негэнтропия» (параметр, противоположный энтропии). Вместе с тем в ряде основополагающих работ негэнтропия вообще не рассматривается [1, 3], а энтропия не получает словесного определения, ограничиваясь математической записью. Чаще всего встречается утверждение, что энтропия есть мера беспорядка системы. Однако данное утверждение применимо к так называемой информационной энтропии, которую, согласно [4], отождествлять с энтропией термодинамической не следует.

Прикладные теплоэнергетические задачи в подавляющем большинстве случаев решаются с использованием закономерностей классической равновесной термодинамики. Значительные достижения по применению методов неравновесной термодинамики в различных областях науки и техники [5] побуждают использовать эти методы и при решении теплоэнергетических задач. Особенно актуально применение данных понятий при разработке критериев эффективности различных тепловых процессов.

Фундаментальный смысл второго начала термодинамики заключается в том, что самопроизвольный поток энергии в термодинамической системе направлен от области с большей плотностью энергии к области с меньшей, к примеру тепловой поток движется от места с большей температурой к месту с меньшей. Поскольку любой подобный поток необратим, должна существовать некоторая монотонная функция состояния, всегда либо возрастающая, либо убывающая. Эта функция и есть энтропия. Производство энтропии — возникновение энтропии в физической системе за единицу времени в результате протекающих в ней неравновесных процессов.

Максимальное производство энтропии при прочих равных условиях достигается при простом рассеивании высокопотенциальной энергии в низкопотенциальную окружающую среду. Производство энтропии будет меньше, если в процессе данного рассеивания часть тепловой энергии преобразовывается в иные формы, например механическую или химическую, либо плотность тепловой энергии локально поддерживается на уровне, превышающем уровень плотности энергии окружающей среды. Поэтому

мущ предлагаются разность максимально возможного и данного изменений энтропии отождествить с изменением негэнтропии:

$$dN = dS_{\max} - dS.$$

В [2] введено понятие энтропийной эффективности

$$\eta = \frac{dN}{dS} \leq 1,$$

характеризующей степень необратимости процесса упорядочения некоторой системы; при приближении к обратимому процессу $\eta \rightarrow 1$. Введем аналогичное отношение изменения негэнтропии к максимальному изменению энтропии и свяжем данное отношение с энтропийной эффективностью теплофизического процесса:

$$\eta = \frac{dN}{dS_{\max}} = 1 - \frac{dS}{dS_{\max}}.$$

Для иллюстрации введенного термина рассмотрим несколько простых примеров.

Отапливаемое помещение, рассеивающее теплоту в окружающую среду

Задача определения энергетической эффективности процесса отопления помещения остается неразрешенной, поскольку применение коэффициента полезного действия для данного процесса не представляется возможным из-за отсутствия полезной механической работы. Определение энтропийной эффективности в этом случае позволит разработать критерий, характеризующий степень термической эффективности зданий.

Рассмотрим простейшую систему отапливаемого помещения или здания, состоящего из ограждающих конструкций и отопительного прибора (батареи). Отопительный прибор характеризуется средней температурой теплоносителя T_b и полным коэффициентом термического сопротивления теплопередаче R_b с учетом площади теплообмена F_b . Помещение характеризуется средней температурой воздуха $T_{\text{зл}}$, постоянной по всему объему, коэффициентом термического сопротивления теплопередаче стен $R_{\text{ст}}$ с учетом площади $F_{\text{ст}}$. Окружающая среда по отношению к помещению представляет собой термостат с заданной температурой $T_{\text{окр}}$. Полагается, что воздух внутри помещения находится в состоянии равновесия.

Предполагается, что система стационарна, причем температура теплоносителя изменяется



в соответствии с изменением температуры окружающей среды так, чтобы поддержать заданную исходно температуру внутри помещения постоянной. Следует отметить, что вопросы, связанные с энергетическими затратами на осуществление автоматического регулирования температуры, выходят за рамки данной статьи.

Мощность теплового потока через разделяющую две среды стенку описывается стандартным уравнением

$$Q = \frac{1}{R^Q} (T_1 - T_2),$$

где R^Q — средний коэффициент полного термического сопротивления среды, учитывающий коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи, толщину среды (стенки или стенок) и площадь теплообмена, через которую протекает данный тепловой поток, и имеющий размерность $K/\text{Вт}$. Если привести размерности термического сопротивления и температур к энергетической, умножая на постоянную Больцмана, то получим $[R^Q] = \text{Дж}/\text{Вт}$.

Общепринятая формула производства энтропии потоком теплоты через среду, имеющую ненулевое термическое сопротивление:

$$\frac{dS}{d\tau} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) Q = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \frac{1}{R} (T_1 - T_2).$$

Перепишем уравнение производства энтропии тепловым потоком, введя параметр $X^Q = \frac{T_2}{T_1}$:

$$\frac{dS^Q}{d\tau} = \frac{1}{R^Q} \frac{(1-X^Q)^2}{X^Q}.$$

Приведенная формула математически совпадает с общепринятой. Очевидно, что размерность производства энтропии определяется размерностью коэффициента термического сопротивления. Предложение использовать отношение температур X^Q в явной форме вызвано главным образом стремлением избежать произведения температур, поскольку такое произведение не имеет физического смысла. В приведенном уравнении отсутствует выражение градиента температур, но характер изменения температуры определяется как геометрическими особенностями теплопроводящей среды, так и значением коэффициента теплопроводности, в общем слу-

чае нелинейно зависящего от температуры, а эти факторы следует учитывать при определении R^Q .

Первый этап расчета — определение тепловых потерь помещения, которые в силу стационарности рассматриваемого процесса равны тепловой мощности отопительных приборов:

$$Q = \frac{1}{R_{\text{ст}}} (T_{\text{зд}} - T_{\text{окр}}) = \frac{1}{R_6} (T_6 - T_{\text{зд}}),$$

Из этого равенства рассчитывается средняя температура теплоносителя T_6 , движущегося в отопительной батарее и по сути являющегося внутренним источником энергии для рассматриваемой системы.

Следующий этап заключается в определении производства энтропии.

Определим производство энтропии при передаче теплоты от отопительного элемента внутреннему воздуху:

$$\frac{dS_6}{d\tau} = \frac{1}{R_6^Q} \frac{(1-X_6^Q)^2}{X_6^Q},$$

$$\text{где } X_6^Q = \frac{T_{\text{зд}}}{T_6}.$$

Соответственно производство энтропии при передаче теплоты от внутреннего воздуха наружу через ограждающие конструкции описывается уравнением

$$\frac{dS_{\text{ст}}}{d\tau} = \frac{1}{R_{\text{ст}}^Q} \frac{(1-X_{\text{ст}}^Q)^2}{X_{\text{ст}}^Q},$$

$$\text{где } X_{\text{ст}}^Q = \frac{T_{\text{окр}}}{T_{\text{зд}}}.$$

Дополнительно введем такой параметр, как минимальное отношение температур

$$X_{\text{min}}^Q = \frac{T_{\text{окр}}}{T_6}.$$

Введем термин «термически предельно неэффективное здание». Таким зданием будем считать помещение без стен, или, что математически эквивалентно, со стенами, имеющими нулевое термическое сопротивление теплопередаче. В этом случае температура в помещении будет равна температуре окружающей среды, являющейся термостатом ($T_{\text{зд}} = T_{\text{окр}}$); соответственно производство энтропии стенами равно нулю, а общее производство энтропии опреде-

ится термическим сопротивлением только отопительной батареи и будет максимальным:

$$\frac{dS_{\max}}{d\tau} = \frac{1}{R_6^Q} \frac{\left(1 - X_{\min}^Q\right)^2}{X_{\min}^Q}.$$

С другой стороны, предельно эффективным зданием следует считать здание с адиабатными стенами, у которых бесконечно большое значение термического сопротивления теплопередаче, и поэтому не имеющее теплопотерь. В данном случае отсутствуют тепловые потоки как у внутреннего воздуха, так и у наружного, и, следовательно, производство энтропии равно нулю.

В результате численного анализа было обнаружено, что существует величина, принимающая значения от нуля до единицы и в явной форме не зависящая от температур (если в первом приближении принять, что температура не оказывает влияния на коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи):

$$\frac{dS_6}{d\tau} + \frac{dS_{\text{ст}}}{d\tau} = \text{const.}$$

$$\frac{dS_{\max}}{d\tau}$$

Эта величина растет с увеличением полного термического сопротивления отопительного прибора и уменьшается с ростом полного термического сопротивления стен. Ориентируясь на данный эффект, а также учитывая вышеизложенные соображения об энтропийной эффективности, предлагается использовать следующий параметр в качестве показателя энтропийной эффективности отапливаемого помещения:

$$\eta^Q = 1 - \frac{\frac{dS_6}{d\tau} + \frac{dS_{\text{ст}}}{d\tau}}{\frac{dS_{\max}}{d\tau}}.$$

При этом производство негэнтропии равно

$$\frac{dN}{d\tau} = \frac{dS_{\max}}{d\tau} - \left(\frac{dS_6}{d\tau} + \frac{dS_{\text{ст}}}{d\tau} \right).$$

Производство негэнтропии связано с локальным поддержанием значения температуры в помещении выше, чем температура окружающей среды ($T_{\text{зд}} > T_{\text{окр}}$). Необходимо отметить, что,

в отличие от отношения $\frac{dN}{dS_{\max}}$, отношение

$$\frac{dN}{dS} = \frac{dN}{dS_6 + dS_{\text{ст}}}$$

не является постоянным и принимает значения как меньше, так и больше единицы, а поэтому не может служить мерой энтропийной эффективности.

Энтропийная эффективность зависит от температур наружного и внутреннего воздуха и теплоносителя в системе отопления лишь в той мере, в какой от этих температур зависят коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности. Следовательно, эффективность помещения зависит только от теплофизических свойств отопительных приборов, ограждающих конструкций и свойств теплоносителей и определяется следующим выражением:

$$\eta^Q = \frac{1}{1 + \frac{R_6^Q}{R_{\text{ст}}^Q}}.$$

Полученный критерий, характеризующий степень энтропийной эффективности процесса поддержания температуры в отапливаемом помещении за счет теплоотдачи от отопительных приборов, не рассматривает степень совершенства процесса передачи теплоты в тепловых сетях и трансформацию параметров теплоносителя в тепловых узлах здания.

Очевидно, что повысить тепловую эффективность здания можно двумя путями: увеличением термического сопротивления ограждающих конструкций $R_{\text{ст}}^Q$ и уменьшением термического сопротивления отопительных приборов R_6^Q . Если не интенсифицировать теплоотдачу от отопительных приборов, то снижения R_6^Q можно достигнуть простым увеличением площади теплообмена, наращивая количество секций отопительных батарей. В этом случае неизменная тепловая нагрузка остается при условии уменьшения средней температуры греющего теплоносителя, т. е. снижения параметра X_6 и соответственного снижения производства энтропии при передаче теплоты от отопительного элемента внутреннему воздуху. Однако следует иметь в виду, что наращивание количества секций, во-первых, приводит к увеличению металлоемкости, во-вторых,



к росту гидравлического сопротивления и, соответственно, к повышенным затратам на транспорт греющего теплоносителя.

Результаты численного эксперимента представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 1.

Паровая турбина, совершающая работу

Теперь применим принцип энтропийной эффективности, рассматривая термодинамический цикл паротурбинной установки, которая работает в диапазоне температур от T_1 до T_2 . Пусть в цикле подводится теплота в количестве Q_1 и отводится к холодному источнику теплота Q_2 , кроме того, в процессе совершается полезная работа $L = Q_1 - Q_2$.

Выражение для изменения энтропии в процессе расширения примет вид

$$\Delta S = -\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2}.$$

Как известно, идеальный адиабатный процесс расширения пара в турбине является изо-

энтропийным, т. е. $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$, и $\Delta S = 0$. Но реальный

процесс характеризуется неравенством $\Delta S > 0$.

В случае, если полезная работа не производится, т. е. $Q_2 = Q_1$, вся подведенная высокопотенциальная тепловая энергия бесполезно рассеивается в низкопотенциальную окружающую среду, и тогда изменение энтропии максимально:

$$\Delta S_{\max} = -\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_1}{T_2}.$$

Разницу между максимальным и текущим изменением энтропии назовем негэнтропией, связав данное понятие с превращением тепловой энергии в иную форму (в данном случае в механическую энергию вращения ротора турбины):

$$\Delta N = \Delta S_{\max} - \Delta S = \frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_2}{T_2} = \frac{L}{T_2}.$$

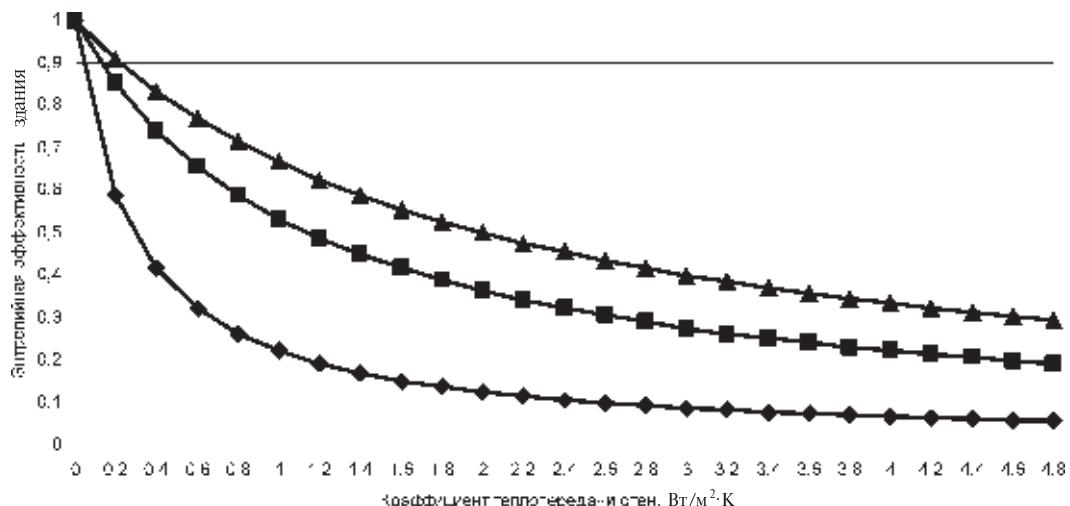
Выражение для энтропийной эффективности примет вид

$$\frac{\Delta N}{\Delta S_{\max}} = 1 - \frac{\Delta S}{\Delta S_{\max}},$$

откуда нетрудно получить следующую зависимость:

$$\frac{\Delta N}{\Delta S_{\max}} = \frac{\left(\frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_2}{T_2}\right)T_2}{\left(-\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_1}{T_2}\right)T_2} =$$

$$= \frac{\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}}{\frac{T_1 - T_2}{T_1}} = \frac{1 - \frac{Q_2}{Q_1}}{1 - \frac{T_2}{T_1}} = \frac{\eta_T}{\eta_{TK}}.$$



Зависимость энтропийной эффективности здания от коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций при различных величинах площадей теплообмена (\blacktriangle — 5 м^2 ; \blacksquare — 20 м^2 ; \blacksquare — 35 м^2) отопительных приборов

Таблица 1

Влияние температуры окружающего воздуха на энергетические и термодинамические характеристики

$T_{\text{зл}}$, °C	$T_{\text{окр}}$, °C	k_{ct} , Bt/(m²·K)	k_6 , Bt/(m²·K)	F_{ct} , м²	F_6 , м²	Q , Вт	T_6 , °C	X_6	X_{ct}	X_{\min}	dS_{\max} , Bt/K	dS_6 , Bt/K	dS_{ct} , Bt/K	dN , Bt/K	$\frac{dS_6}{dS_{\max}}$	$\frac{dS_{\text{ct}}}{dS_{\max}}$	$\frac{dS_6}{dS_{\text{ct}}}$	$\frac{dN}{dS_6 + dS_{\text{ct}}}$	$\frac{dN}{dS_{\max}}$
18	-40	1,276	9,65	170	19	12581	86,6	0,809	0,801	0,648	35,045	8,242	10,750	16,0527	0,2352	0,3067	0,7667	0,04037	0,4581
18	-37	1,276	9,65	170	19	11931	83,1	0,817	0,811	0,663	31,423	7,485	9,544	14,3937	0,2382	0,3037	0,7843	0,04606	0,4581
18	-34	1,276	9,65	170	19	11280	79,5	0,826	0,821	0,678	28,015	6,758	8,424	12,8328	0,2412	0,3007	0,8023	0,05284	0,4581
18	-31	1,276	9,65	170	19	10629	76,0	0,834	0,832	0,694	24,817	6,062	7,387	11,3680	0,2443	0,2977	0,8206	0,06101	0,4581
18	-28	1,276	9,65	170	19	9978	72,4	0,843	0,842	0,709	21,826	5,397	6,431	9,9977	0,2473	0,2946	0,8393	0,07096	0,4581
18	-25	1,276	9,65	170	19	9328	68,9	0,851	0,852	0,726	19,037	4,765	5,551	8,7201	0,2503	0,2916	0,8584	0,08320	0,4581
18	-22	1,276	9,65	170	19	8677	65,3	0,860	0,863	0,742	16,447	4,167	4,746	7,5338	0,2533	0,2886	0,8779	0,09849	0,4581
18	-19	1,276	9,65	170	19	8026	61,8	0,869	0,873	0,759	14,054	3,603	4,013	6,4375	0,2564	0,2856	0,8978	0,11788	0,4581
18	-16	1,276	9,65	170	19	7375	58,2	0,879	0,883	0,776	11,854	3,075	3,349	5,4301	0,2594	0,2825	0,9181	0,14291	0,4581
18	-13	1,276	9,65	170	19	6725	54,7	0,888	0,894	0,794	9,846	2,584	2,752	4,5103	0,2624	0,2795	0,9389	0,17594	0,4581
18	-10	1,276	9,65	170	19	6074	51,1	0,898	0,904	0,811	8,028	2,131	2,220	3,6775	0,2654	0,2765	0,9601	0,22067	0,4581
18	-7	1,276	9,65	170	19	5423	47,6	0,908	0,914	0,830	6,398	1,718	1,750	2,9307	0,2685	0,2735	0,9818	0,28315	0,4581
18	-4	1,276	9,65	170	19	4772	44,0	0,918	0,924	0,849	4,954	1,345	1,340	2,2693	0,2715	0,2704	1,0039	0,37393	0,4581
18	-1	1,276	9,65	170	19	4121	40,5	0,928	0,935	0,868	3,696	1,015	0,988	1,6929	0,2745	0,2674	1,0266	0,51257	0,4581
18	2	1,276	9,65	170	19	3471	36,9	0,939	0,945	0,887	2,622	0,728	0,693	1,2010	0,2776	0,2644	1,0498	0,73883	0,4581
18	5	1,276	9,65	170	19	2820	33,4	0,950	0,955	0,907	1,732	0,486	0,453	0,7934	0,2806	0,2614	1,0736	1,14372	0,4581
18	8	1,276	9,65	170	19	2169	29,8	0,961	0,966	0,928	1,026	0,291	0,265	0,4699	0,2836	0,2583	1,0978	1,97480	0,4581

Таблица 2

Влияние температуры, поддерживаемой на постоянном уровне внутри помещения, на энергетические и термодинамические характеристики

T_{3d} , °C	$T_{окр}$, °C	k_{ct} , BT/(M ² ·K)	k_6 , BT/(M ² ·K)	F_{ct} , M ²	F_6 , M ²	Q , Bт	T_6 , °C	X_6	X_{ct}	X_{min}	dS_{max} , BT/K	dS_6 , BT/K	dS_{ct} , BT/K	dN , Bт/K	$\frac{dS_6}{dS_{max}}$	$\frac{dS_{ct}}{dS_{max}}$	$\frac{dS_6}{dS_{ct}}$	$\frac{dN}{dS_6 + dS_{ct}}$	$\frac{dN}{dS_{max}}$
10	-25	1,276	9,65	170	19	7592	51,4	0,872	0,876	0,765	13,291	3,421	3,782	6,0881	0,2574	0,2845	0,9046	0,12559	0,4581
11	-25	1,276	9,65	170	19	7809	53,6	0,870	0,873	0,759	13,967	3,582	3,987	6,3979	0,2565	0,2855	0,8985	0,11871	0,4581
12	-25	1,276	9,65	170	19	8026	55,8	0,867	0,870	0,754	14,656	3,746	4,197	6,7135	0,2556	0,2863	0,8926	0,11238	0,4581
13	-25	1,276	9,65	170	19	8243	58,0	0,864	0,867	0,749	15,357	3,911	4,411	7,0346	0,2547	0,2872	0,8867	0,10654	0,4581
14	-25	1,276	9,65	170	19	8460	60,1	0,862	0,864	0,745	16,070	4,079	4,630	7,3611	0,2538	0,2881	0,8809	0,10115	0,4581
15	-25	1,276	9,65	170	19	8677	62,3	0,859	0,861	0,740	16,795	4,248	4,854	7,6931	0,2529	0,2890	0,8751	0,09615	0,4581
16	-25	1,276	9,65	170	19	8894	64,5	0,856	0,858	0,735	17,531	4,419	5,082	8,0303	0,2520	0,2899	0,8695	0,09152	0,4581
17	-25	1,276	9,65	170	19	9111	66,7	0,854	0,855	0,730	18,278	4,591	5,314	8,3727	0,2512	0,2908	0,8639	0,08721	0,4581
18	-25	1,276	9,65	170	19	9328	68,9	0,851	0,852	0,726	19,037	4,765	5,551	8,7201	0,2503	0,2916	0,8584	0,08320	0,4581
19	-25	1,276	9,65	170	19	9544	71,1	0,849	0,849	0,721	19,806	4,941	5,793	9,0725	0,2495	0,2925	0,8529	0,07946	0,4581
20	-25	1,276	9,65	170	19	9761	73,2	0,846	0,846	0,716	20,586	5,118	6,038	9,4297	0,2486	0,2933	0,8476	0,07597	0,4581
21	-25	1,276	9,65	170	19	9978	75,4	0,844	0,844	0,712	21,376	5,296	6,288	9,7918	0,2478	0,2942	0,8422	0,07270	0,4581
22	-25	1,276	9,65	170	19	10195	77,6	0,841	0,841	0,707	22,177	5,476	6,542	10,1585	0,2469	0,2950	0,8370	0,06964	0,4581
23	-25	1,276	9,65	170	19	10412	79,8	0,839	0,838	0,703	22,988	5,657	6,801	10,5299	0,2461	0,2958	0,8318	0,06677	0,4581
24	-25	1,276	9,65	170	19	10629	82,0	0,837	0,835	0,699	23,808	5,839	7,063	10,9057	0,2453	0,2967	0,8267	0,06407	0,4581
25	-25	1,276	9,65	170	19	10846	84,2	0,834	0,832	0,695	24,638	6,023	7,330	11,2860	0,2444	0,2975	0,8217	0,06154	0,4581
26	-25	1,276	9,65	170	19	11063	86,3	0,832	0,830	0,690	25,478	6,207	7,600	11,6707	0,2436	0,2983	0,8167	0,05915	0,4581



Таким образом, энтропийная эффективность паротурбинного цикла равна отношению КПД реального цикла (например, цикла Ренкина) к термическому КПД прямого цикла Карно для заданного диапазона температур. Другими словами, энтропийная эффективность показывает, насколько реальный цикл приближается к идеальному циклу Карно.

Тепловой насос, потребляющий работу

Для определения энтропийной эффективности обратного цикла рассмотрим цикл теплонасосной установки, работающей в диапазоне температур от T_2 до T_1 , причем $T_1 > T_2$. Подводимая теплота равна Q_2 , затрачиваемая на привод компрессора работа равна L ; теплота, отводимая потребителю, принимает значение $Q_1 = L + Q_2$.

Изменение энтропии в процессе сжатия:

$$\Delta S = -\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} + \frac{L}{T_1}.$$

В случае, если внешняя работа необратимо преобразуется в низкопотенциальную теплоту и рассеивается, повышения температуры не происходит ($T_2 = T_1$), и тогда изменение энтропии максимально:

$$\Delta S_{\max} = \frac{L}{T_2}.$$

Разницу между максимальным и текущим изменением энтропии аналогично назовем негэнтропией, связав ее в данном случае с передачей теплоты от низкопотенциального источника высокопотенциальному с учетом дополнительного нагрева за счет преобразования работы в теплоту:

$$\Delta N = \Delta S_{\max} - \Delta S = \frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1}.$$

Выражение для энтропийной эффективности в общем случае принимает аналогичную предыдущей форму:

$$\frac{\Delta N}{\Delta S_{\max}} = 1 - \frac{\Delta S}{\Delta S_{\max}}.$$

И далее:

$$\frac{\Delta N}{\Delta S_{\max}} = \frac{\left(\frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1}\right)T_2}{\left(\frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1}\right)Q_1} =$$

$$= \frac{\frac{T_1 - T_2}{T_1}}{\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}} = \frac{\frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}}{\frac{T_1}{T_1 - T_2}} = \frac{\xi_T}{\xi_{TK}}.$$

Таким образом, энтропийная эффективность цикла теплового насоса равна отношению коэффициента теплоиспользования реального цикла к коэффициенту теплоиспользования обратного цикла Карно для заданного диапазона температур. Как и в предыдущем примере, энтропийная эффективность показывает, насколько совершенен реальный цикл по отношению к идеальному циклу Карно.

Предложенный метод определения энтропийной эффективности теплоэнергетических объектов дает возможность численно рассчитать относительную степень тепловой эффективности различных систем, в том числе с преобразованием энергии в различные формы. Энтропийная эффективность наряду с общезвестными параметрами позволяет определить степень совершенства объектов, потребляющих тепловую энергию, в том числе работающих по обратному циклу, таких, как тепловые насосы. Кроме того, применение данных критерии позволяет оценить степень совершенства комбинированных схем использования тепловых насосов в системах централизованного теплоснабжения [7], методов совершенствования теплогенерирующего оборудования [8], а также методов оптимизации отпуска теплоты от ТЭЦ потребителям [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур [Текст] : учебное издание / И. Пригожин, Д. Кондепуди. — пер. с англ. — М.: Мир, 2002.— 461 с., ил.— ISBN 5-03-003538-9.

2. Поплавский, Р.П. Термодинамика информационных процессов [Текст]: монография /

Р.П. Поплавский.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981.— 256 с., ил.

3. Квасников, И.А. Термодинамика и статистическая физика [Текст] : учебное пособие в 3 ч. / И.А. Квасников.— М.: Едиториал УРСС, 2010.— ISBN 978-5-354-01305-0.



4. Базаров, И.П. Заблуждения и ошибки в термодинамике [Текст] : Изд. 2-е, испр. / И.П. Базаров.— М.: Едиториал УРСС, 2003.— 120 с.— ISBN 5-354-00391-1

5. Эбелинг, В. Физика процессов эволюции [Текст] : пер. с нем. / В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель.— М.: Эдиториал УРСС, 2001.— 328 с.— ISBN 5-8360-0233-9

6. Бриллюэн, Л. Наука и теория информации [Текст] : пер. с англ. / Л. Бриллюэн.— М.: Государственное изд-во физ.-мат. литературы, 1960.

7. Батухтин, А.Г. Использование тепловых насосов для повышения тепловой мощности и эффективности существующих систем централизованного теплоснабжения [Текст] / А.Г. Батухтин //

Научно-технические ведомости СПБГПУ.— 2010.— № 2.— С. 28–33.

8. 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.

9. Батухтин, А.Г. Методы повышения эффективности функционирования современных систем транспортировки, распределения и потребления тепловой энергии [Текст] / А.Г. Батухтин, М.С. Басс, С.Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.— 2009. № 2.— С. 199–202.

УДК 662.76

A.C. Алешина

ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ НА РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЕ

Будущее тепловых электростанций многие специалисты связывают с возможностями переработки твердых топлив в жидкое (методом гидрогенизации) и газообразные (путем газификации). Газификация позволяет не только осуществить экологически чистое двухстадийное сжигание низкокачественных твердых топлив, но и использовать горячие продукты сгорания генераторного газа непосредственно для привода газовых турбин, дизельных двигателей и двигателей внешнего сгорания (двигатели Стирлинга). К примеру, отработанные дымовые газы после газовой турбины могут быть утилизированы в паровом или водогрейном кotle, а полученный пар использован для привода паровой турбины. Такой комбинированный парогазовый цикл является в настоящее время самым термодинамически эффективным, его коэффициент полезного действия по выработке электроэнергии может достигать 45 %. Как известно, КПД существующих паротурбинных электростанций не превышает 39 %.

К 2000 году в развитых странах проведена разработка национальных программ по использованию одного из самых перспективных направлений в возобновляемой энергетике — газификации биомассы для выработки электроэнергии. Так-

же разрабатываются программы по переходу на технологию «чистый уголь», т. е. газификацию угля с последующим сжиганием горючего газа в газовых турбинах большой мощности. Ведется строительство крупных и малых электростанций с газификацией угля и биомассы. В итоге в энергетическом балансе развивающихся и развитых стран растет доля электроэнергии, полученной по технологии газификации.

В статье рассмотрены работающие в мировой энергетике станции, которые реализуют технологию газификации.

Газогенераторная электростанция «Babcock & Wilcox Volund»

Электростанция «Babcock & Wilcox Volund» — первая электростанция большой мощности в Дании, использующая процесс газификации биомассы для снабжения тепло- и электроэнергией районных потребителей (рис. 1). Станция мощностью 5 МВт потопливу, построенная в 1993 году, была рассчитана на выработку только тепловой энергии. Основное топливо — древесная щепа. КПД установки составляет около 30 %.

В 2000 году станция переведена на совместную выработку тепловой и электрической энер-

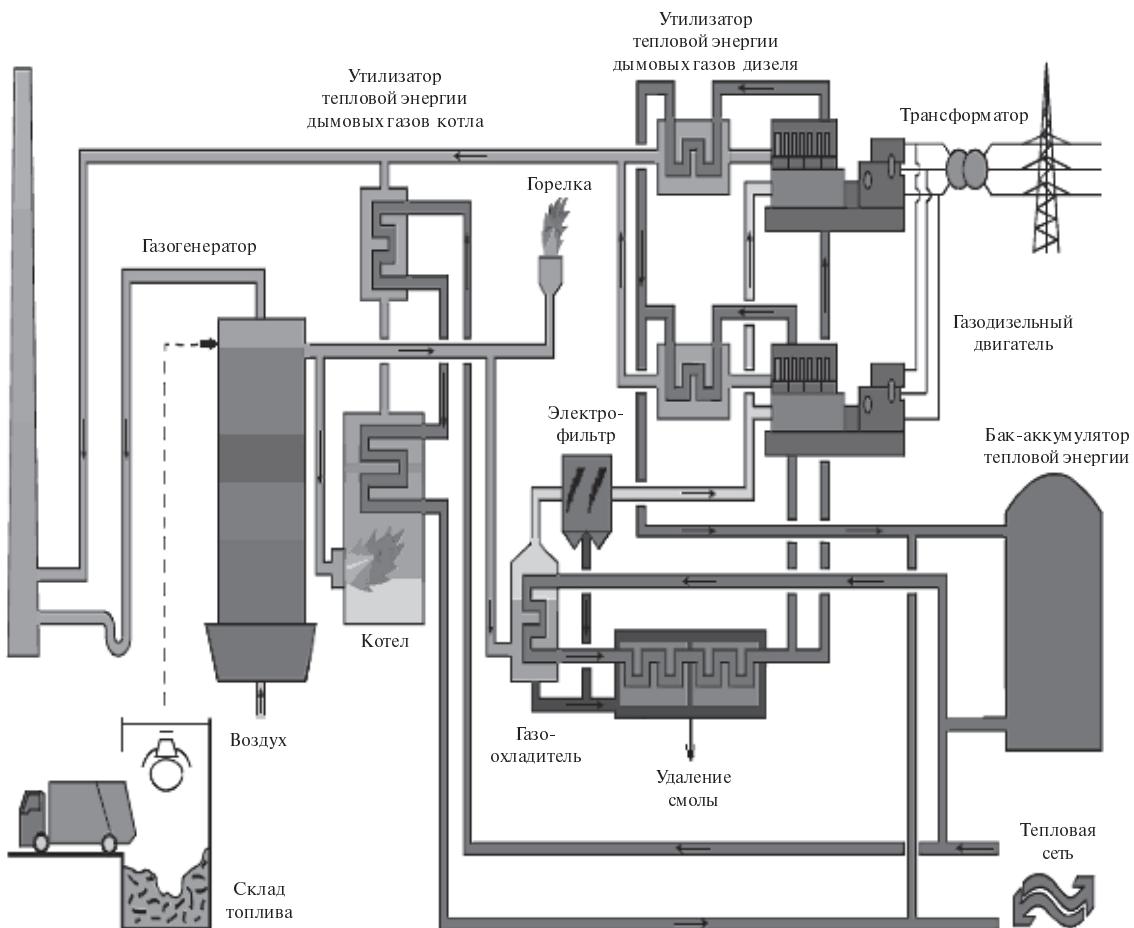


Рис. 1. Электростанция фирмы «Babcock & Wilcox Volund»
с комбинированной выработкой 1,5 МВт электрической и 2 МВт тепловой энергии

тии. Мощность по топливу снижена до 3,5 МВт, при этом выработка тепловой энергии обеспечивается на уровне 2 МВт, а электрической — 1,5 МВт. В процессе эксплуатации отмечено, что установка может работать на пониженных нагрузках без существенного снижения КПД, что является ее преимуществом при работе в летнее время.

Основное оборудование станции:

слойевой газогенератор мощностью 3,5 МВт, работающий по прямому процессу;

котел, в котором сжигается генераторный газ;

два газодизельных двигателя австрийской фирмы «Jenbacher» электрической мощностью 648 и 768 кВт;

система очистки генераторного газа, состоящая из охладителя и электрофильтра;

бак-накопитель, в который поступают нерастворимые в воде смолы, отделенные от генераторного газа в системе очистки;

котел для утилизации смол; бак-аккумулятор тепловой энергии.

Перед подачей топлива в газогенератор осуществляется сушка древесины с начальной влажности 40–50 % до 23 %. Характеристика получаемого генераторного газа приведена в табл. 1 [3].

В 2007 году подобная станция пущена в эксплуатацию в Японии. Топливом служит щепа вишневого дерева. Расход топлива — 60 т/день.

Электростанция «The Kymijarvi Power Plant»

Пример установки, разработанной на основе газогенераторов с циркулирующим кипящим слоем, — станция The Kymijarvi Power Plant, построенная в 1998 году в г. Лахти (Финляндия) (рис. 2). Особенностью установки является совместное использование двух видов топлива в котле — угля и генераторного газа.



Таблица 1

Усредненная характеристика получаемого генераторного газа

Состав генераторного газа, % об.						
H ₂	CO	CO ₂	O ₂	CH ₄	N ₂	Q_i^r , МДж/м ³
19,01	22,83	11,91	0,17	5,34	40,73	6,59

Станция вырабатывает 167 МВт электрической и 240 МВт тепловой энергии. Газогенератор атмосферного давления с циркулирующим кипящим слоем был присоединен к существовавшему котлу паропроизводительностью 125 кг/с. Вырабатывается пар двух уровней давления: 540 °С / 17 МПа и 540 °С / 4 МПа.

Преимуществом такого газогенератора и одновременно главной отличительной особенностью является то, что газогенератор перерабатывает топливо без сушки. Влажность загружаемого топлива может достигать 60 %. Мощность газогенераторов находится в диапазоне 40–70 МВт в зависимости от влажности и теплоты сгорания исходного топлива.

В газогенераторе топливо переводится в горючий газ при температуре 850 °С и атмосферном давлении. Состав получаемого низкокалорийного генераторного газа представлен в табл. 2.

Полученный горячий генераторный газ очищается в совмещенном с газогенератором циклоне. Далее, немного охлаждаясь в теплообменнике, он поступает в энергетический котел, где сжигается в двух газовых горелках, расположенных непосредственно под угольными. Нагреваемый в теплообменнике за счет теплоты горячего генераторного газа воздух подается на газификацию. Генераторный газ замещает примерно 15 % угля, потребляемого котлом.

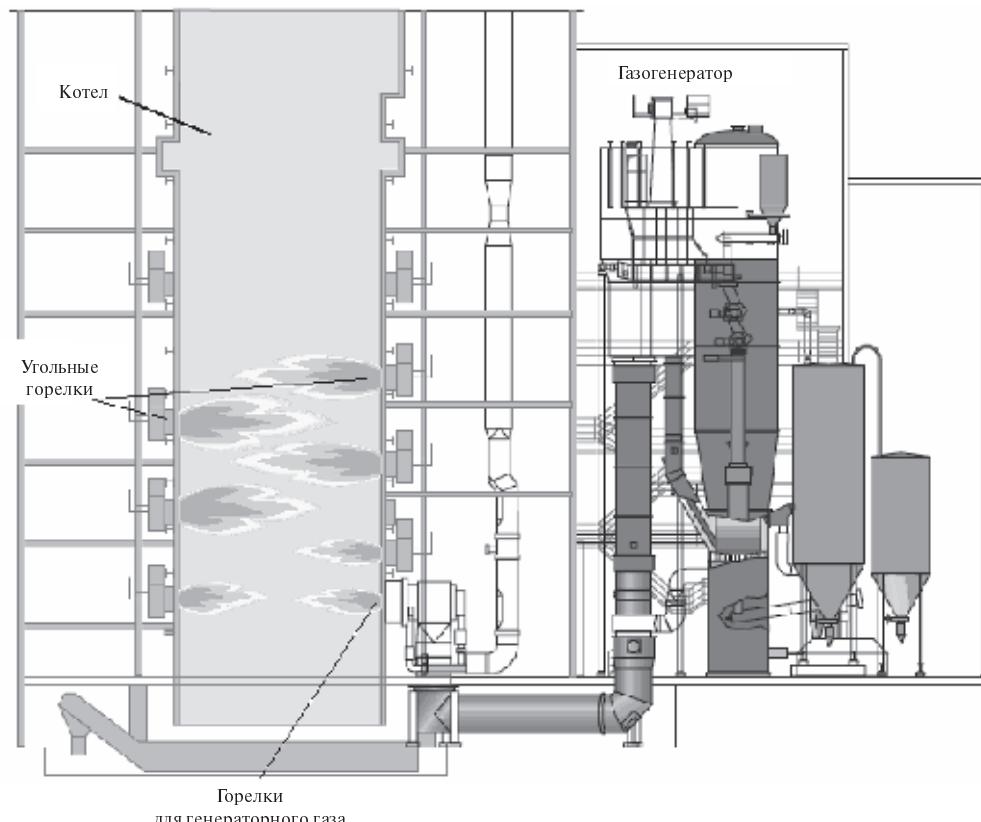


Рис. 2. Электростанция в г. Лахти (The Kymijarvi Power Plant)

Таблица 2

Характеристика получаемого генераторного газа

Состав генераторного газа, % (об.)						
CO	H ₂	C _n H _m	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Q _s ', МДж/м ³
4,6	5,9	3,4	12,9	40,2	33	2,0–2,5

При сжигании топлива в газогенераторе большая часть образовавшейся золы направляется вместе с горючим газом в угольный котел. Другие виды потенциального топлива, такие как промышленные и муниципальные отходы, могут содержать большое количество хлоридов, щелочных металлов и других активных компонентов, которые приводят к коррозии и шлакованию котла. Поэтому их использование в газогенераторе очень ограничено.

Электростанция с газогенераторами под давлением и парогазовым циклом

Шведские энергетические компании «Sydkraft» и «Ahlstrom» ввели в эксплуатацию демонстрационную ТЭЦ, схема которой показана на рис. 3. Задача ТЭЦ – работать по парогазовому циклу на древесных отходах, имеет выходную электрическую мощность 6 МВт и тепловую мощность 9 МВт.

ТЭЦ работает по парогазовому циклу на древесных отходах, имеет выходную электрическую мощность 6 МВт и тепловую мощность 9 МВт.

Подсущенная и измельченная древесина, находящаяся в герметичном баке под давлением, подается питателем в газогенератор циркулирующего кипящего слоя, где перерабатывается в низкокалорийный газ (5 МДж/м³). Температура внутри газогенератора находится на уровне 950–1000 °С, давление — 2,2 МПа. В качестве газифицирующего агента используется воздух.

После предварительного охлаждения в водяном теплообменнике до температуры 350–400 °С генераторный газ очищается от пылевидных частиц и остаточных смол в высокотемпературном керамическом фильтре. Затем чистый газ подается в камеру сгорания газовой турбины, электрическая мощность которой составляет 4,1 МВт. Продукты сгорания от газовой турбины подаются в паровой котел, где вырабатывается пар с давлением 4,0 МПа и температурой 470 °С. Да-

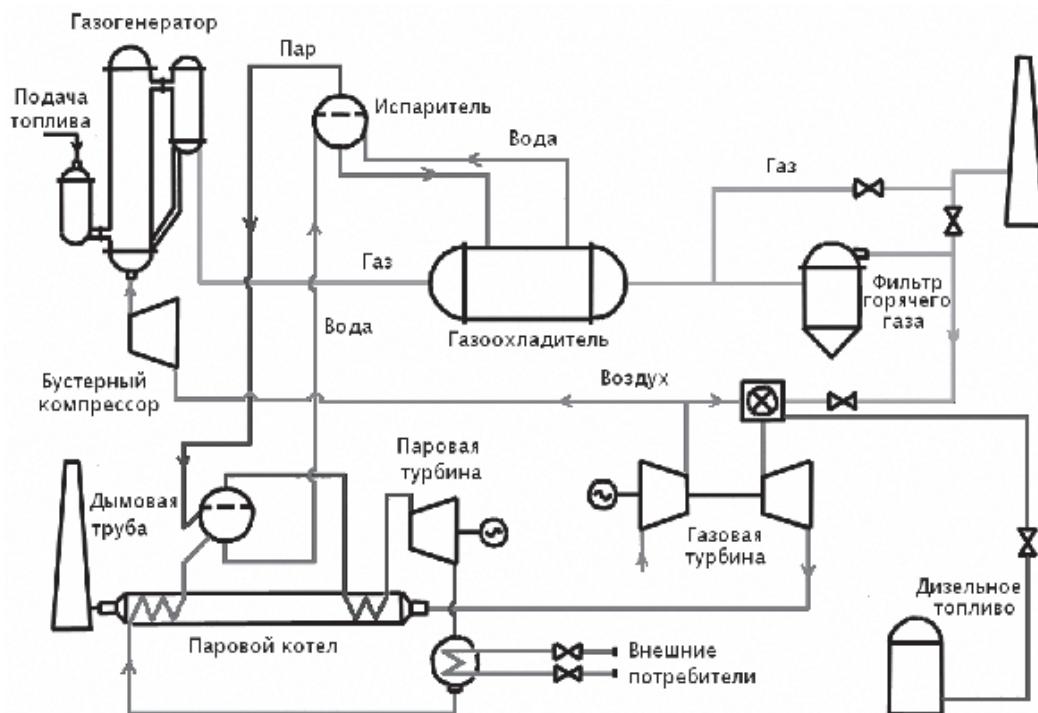
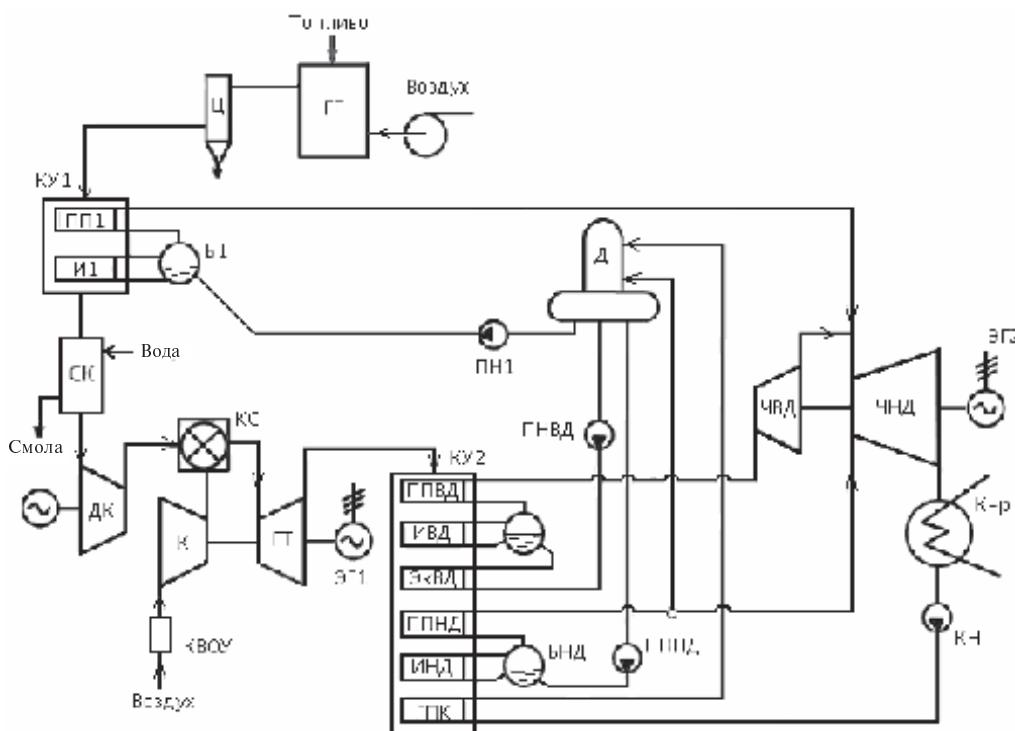


Рис. 3. ТЭЦ компаний «Sydkraft» и «Ahlstrom» с парогазовым циклом на древесных отходах



лее продукты сгорания газа выбрасываются в атмосферу, а водяной пар приводит в действие паровую турбину мощностью 2 МВт. Тепловая энергия отработанного пара используется для теплоснабжения внешних потребителей.

За весь экспериментальный период газогенератор проработал более 85 тыс. час., турбина на генераторном газе — более 3600 час. На демонстрационной ТЭЦ были достигнуты высокие технические показатели, что позволило участникам проекта приступить к разработке коммерческой ТЭЦ электрической мощностью 120 МВт.

Газогенераторная электростанция

на базе слоевого газогенератора,

разработанного в СПбГПУ

В состав установки (рис. 4) входит следующее основное оборудование:

четыре однотипных газогенератора слоевого типа, созданные на базе разработок СПбГПУ

и НТЦ «Энерготехнология», тепловой мощностью по 4,5 МВт каждый, которые позволяют получить газ с теплотой сгорания 3,84 МДж/кг и плотностью $\rho = 1,171 \text{ кг}/\text{м}^3$; производительность одного газогенератора по газу составляет 1,1 кг/с; газотурбинная установка (ГТУ) Taurus-60 фирмы Solar (США) электрической мощностью 5,4 МВт, КПД ГТУ на генераторном газе — 32 %; дожимной компрессор со степенью повышения давления $\pi = 11,5$; паротурбинная установка, содержащая двухцилиндровую паровую турбину, конденсатор, конденсатный насос; деаэрационная установка повышенного давления (0,69 МПа) с подогревом деаэрируемого конденсата; одно- и двухконтурный котлы-utiлизаторы. Расчеты показали, что КПД разработанной установки составляет 34,2 % [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Review of Finnish biomass gasification technologies: OPET Report 4 [Текст] / Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2002.— 21 р.

2. Сергеев, В.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Проектирование и расчет газогенераторных установок при использо-

вании биомассы [Текст]: учеб. пособие / В.В. Сергеев, А.А. Калютик, В.Н. Моршин, Л.П. Стешенков.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.— 60 с.

3. **Зысин, Л.В.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Часть 1: Возобновляемые источники энергии [Текст]: учеб. пособие /

Л.В. Зысин, В.В. Сергеев.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 192 с.

4. **Алешина, А.С.** Газогенераторная парогазовая установка с высоконапорным котлом-utiлизатором [Текст] / А.С. Алешина, В.В. Сергеев // Теплоэнергетика.— 2011.— № 3.— С. 78–80.

УДК 504.06:621.181:622.612

A.A. Тринченко

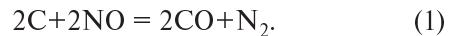
СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СТУПЕНЧАТОМ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА

Выбирая способ снижения выбросов оксидов азота при проектировании паровых котлов, необходимо оценивать их эффективность при работе котла, влияние того или иного способа на КПД установки, сравнивать затраты при внедрении новых технологий.

Наиболее перспективные способы, направленные на снижение вредных выбросов, — технологические, реализуемые на стадии сжигания топлива. Они не требуют значительного увеличения капитальных затрат, а также сравнительно прости в реализации. Одним из самых эффективных среди них можно считать ступенчатое

сжигание, сущность которых заключается в ступенчатой (по ярусам горелок) подаче топлива и воздуха в топку. На рис. 1 показана схема трехступенчатого сжигания.

В нижней зоне топки (зона I) сжигается основная масса топлива (примерно 90 %) при избытке воздуха ($\alpha_1 \approx 1$), благодаря чему в нижнем ярусе топливо сгорает при недостатке окислителя, что способствует снижению генерации топливной составляющей NO_x . На выходе из зоны I (зона активного горения) организуется зона II, в которую подается вторичное топливо (около 10 %) с таким расчетом, чтобы суммарный избыток воздуха в этой зоне составлял $\alpha_{II} \approx 0,9–0,95$. В результате этого в зоне II образуется восстановительная газовая среда с продуктами химического и механического недожога топлива. В восстановительной среде на углероде кокса вторичного топлива происходит разложение выходящих из зоны I оксидов азота с образованием молекулярного азота по реакции



В зону III подается третичный воздух для дожигания продуктов химического и механического недожога топлива в верхней части топки. Ступенчатая подача топлива позволяет дополнительно несколько уменьшить максимальные температуры в топке, что снижает генерацию термических оксидов азота.

Разработанная методика расчета количества разложившихся оксидов азота на поверхности горящих коксовых частиц основана на диффузионно-кинетической теории горения [1] и уни-

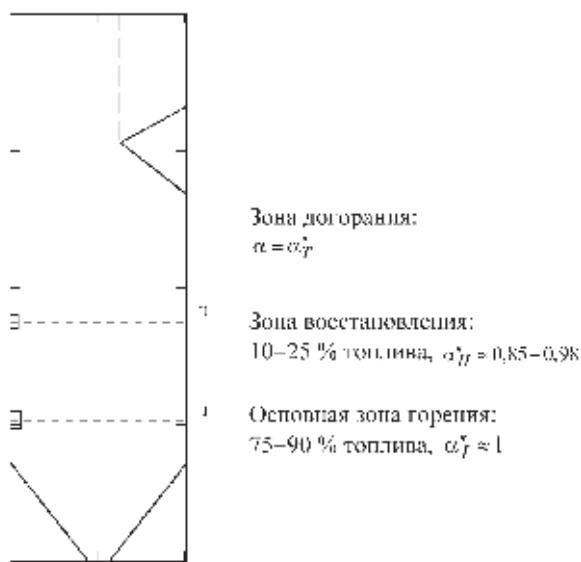


Рис. 1. Схема организации трехступенчатого сжигания



тывает разложение оксидов азота на поверхности коксовых частиц [2]. Константа скорости реакции разложения NO_x описывается зависимостью Аррениуса [3]

$$k = k_0 \exp(-E/(RT)),$$

где k_0 — предэкспоненциальный множитель; E — энергия активации реакции, кДж/моль.

Количество разложившихся оксидов азота $\text{NO}_{\text{разл}}$ рассчитывается по зависимости, учитывающей изменение площади поверхности горящих коксовых частиц (F):

$$\text{NO}_{\text{разл}} = 2,5G_{\text{C+NO}}12F\Delta\tau, \quad (2)$$

где $G_{\text{C+NO}}$ — расход углерода по реакции (1), моль/ $\text{м}^2\cdot\text{с}$; $\Delta\tau$ — интервал времени, с; F — площадь поверхности горящих коксовых частиц, м^2 .

Площадь поверхности горящих коксовых частиц определяется выражением

$$F = \frac{6mn}{\rho_k \delta_{01}} \int_{1-x}^1 e^{-my^n} \frac{(x+y-1)}{y^3} dy, \quad (3)$$

где ρ_k — плотность кокса, $\text{кг}/\text{м}^3$; $x = \delta_1/\delta_{01}$ — относительный размер самой крупной частицы; $y = \delta_{0i}/\delta_{01}$ — отношение начального размера частицы i -й фракции к начальному размеру самой крупной частицы; n — показатель полидисперсности; m — параметр, принимаемый равным 6,9 [1].

Время пребывания коксовых частиц в топке приравнено ко времени пребывания в ней газов.

Количество термических оксидов азота определено из известного уравнения Зельдовича—Садовникова—Франк-Каменецкого:

$$\frac{dC_{\text{NO}}^{\text{терм}}}{d\tau} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{O_2}} \exp\left[-\frac{360000}{RT}\right] \times \\ \times \left\{ \frac{64}{3} O_2 N_2 \exp\left[-\frac{180000}{RT}\right] - [NO]^2 \right\}, \quad (4)$$

где τ — время, с; T — температура, К; NO , N_2 , O_2 — концентрация соответственно оксидов азота, азота и кислорода, г·моль/л.

Генерация топливных оксидов азота определяется моделью Котлера [4] при условии, что топливные оксиды азота образуются на стадии выхода и сгорания летучих:

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{NO}_2}^{\text{тпл}} &= k \frac{10N^r}{Q_i^r} \xi_{\alpha_r} \xi_{\alpha_l} \xi_r \xi_g \xi_{\text{см}}; \\ C_{\text{NO}_2} &= \frac{Q_i^r K_{\text{NO}_2}^{\text{тпл}}}{V_{\text{с.г.}}} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Изменение температуры по высоте факела описано зависимостью, предложенной А.М. Гурвичем и А.Г. Блохом и адаптированной для случая ступенчатого сжигания:

$$\theta = \left(e^{-\alpha Z} - A e^{-\beta Z} \right)^{1/4} b_I + \\ + \left(e^{-\alpha(Z-Z_{\max})} - A e^{-\beta(Z-Z_{\max})} \right)^{1/4} b_{II}, \quad (6)$$

где Z — относительное расстояние от места ввода топлива; Z_{\max} — положение максимума температуры в топочной камере; α и β — опытные коэффициенты; $A = 1 - \theta_0^4$; θ_0 — безразмерная температура на входе в топку.

На основе предложенной модели составлены методика, алгоритм и программа расчета горения топлива и разложения NO на углеродных частицах при ступенчатом сжигании с возможностью определять оптимальные характеристики процесса горения: снижение генерации оксидов азота, уменьшение механического недожога топлива q_4 и др. Разработанная программа имеет блочный характер построения. Это дает возможность отключать некоторые из имеющихся блоков или подключать новые, что делает ее универсальной.

По разработанной методике проведены расчеты выгорания полифракционного пылевоугольного факела и оценка степени разложения оксидов азота на углероде кокса вторичного топлива при организации ступенчатого сжигания смеси кузнецких углей марок Д и Г для котла ТПЕ-214, установленного на Новосибирской ТЭЦ-5 [5]. Для организации трехступенчатого сжигания сотрудниками СибКОТЭС установлены восемь сопел третичного дутья на боковых стенах топки с тангенциальным расположением и противокруткой по отношению к основным горелкам. Кроме того, снижена доля вторичного воздуха через верхний ярус горелок путем установки дополнительных вставок в выходные окна каждого «полуканала» вторичного топлива. Продольный разрез котла ТПЕ-214

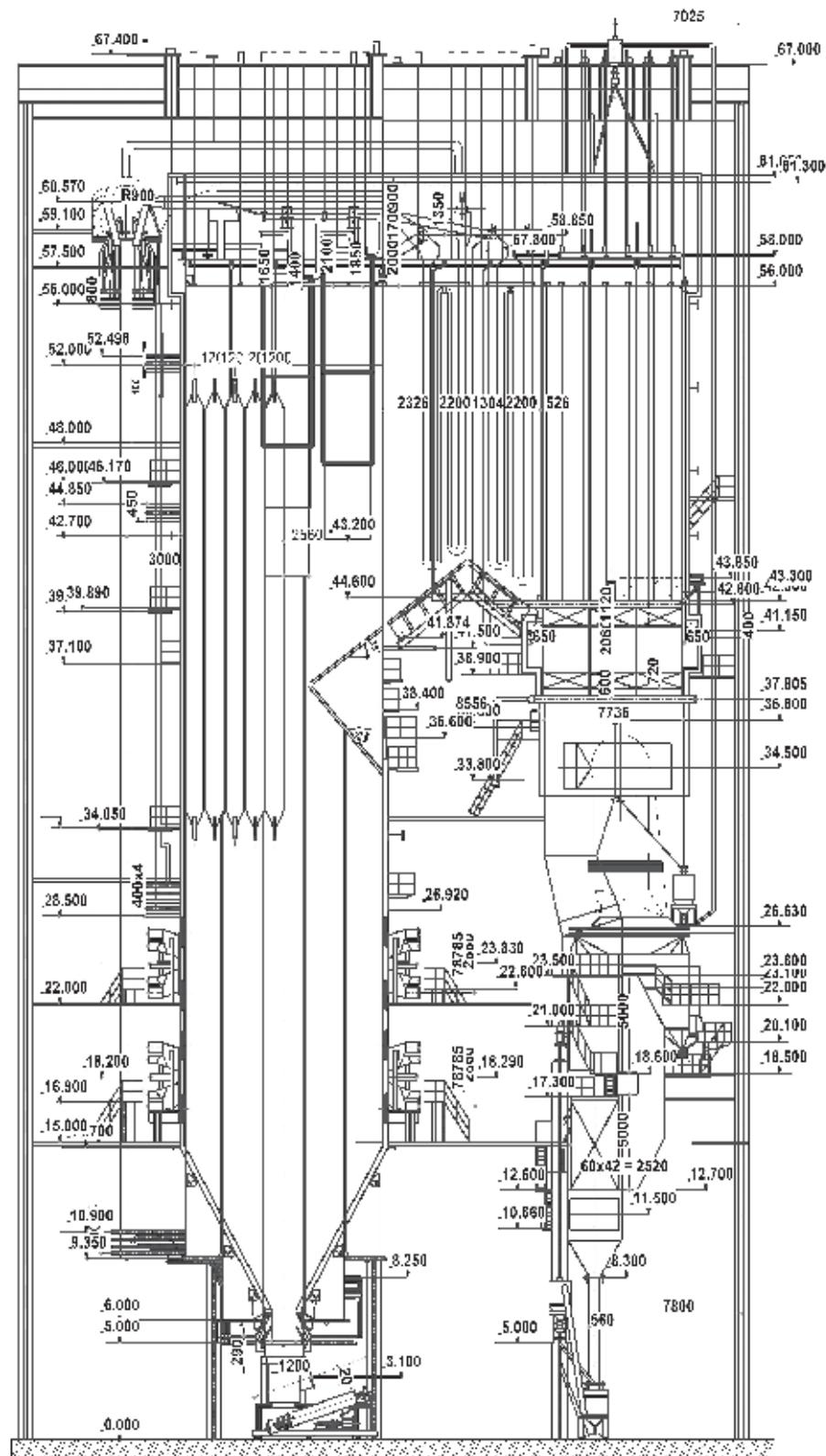


Рис. 2. Продольный разрез котла ТПЕ-214

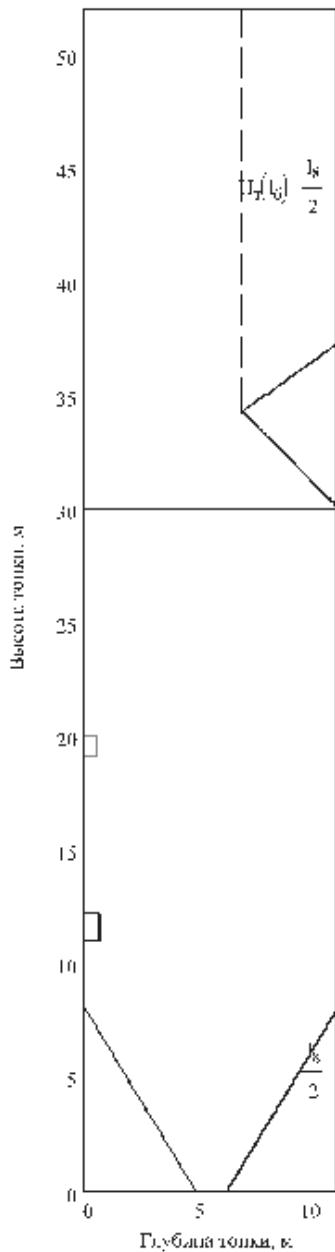


Рис. 3. Эскиз топки котла ТПЕ-214

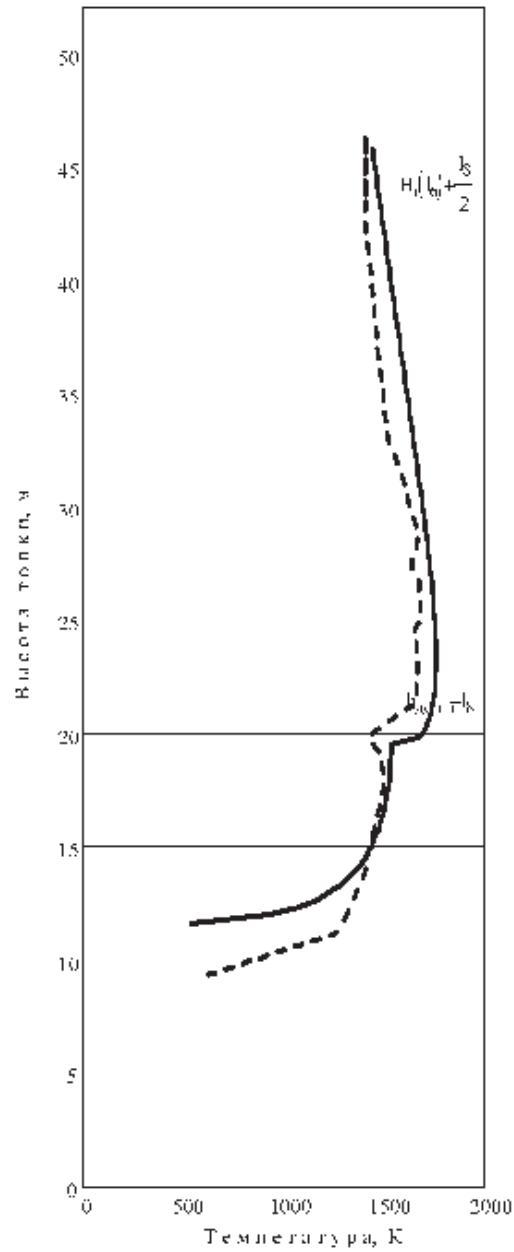


Рис. 4. Профиль температур в топке котла:
— расчетные данные;
- - - опытные данные [4]

и расчетный эскиз его топки представлены соответственно на рис. 2 и 3.

Схема трехступенчатого сжигания на котле №5 НТЭЦ-5 реализована следующим образом: одна пылесистема выделена для приготовления пыли и обеспечения работы горелок ступени восстановления. Транзит пыли через эту ступень осуществляется сушильными инертными газами на четыре тангенциальны расположенные гор-

елки восстановительной ступени, размещенные на 8 метров выше верхнего яруса рабочих горелок. Готовая угольная пыль с тонкостью помола $R_{90\text{-доп}} = 7\%$, что значительно выше, чем у основного топлива ($R_{90\text{-осн}} = 25\%$), транспортируется сушильным агентом по четырем пылепроводам к горелкам нижнего или верхнего яруса. В восстановительные горелки подается 14 % топлива от общего количества.

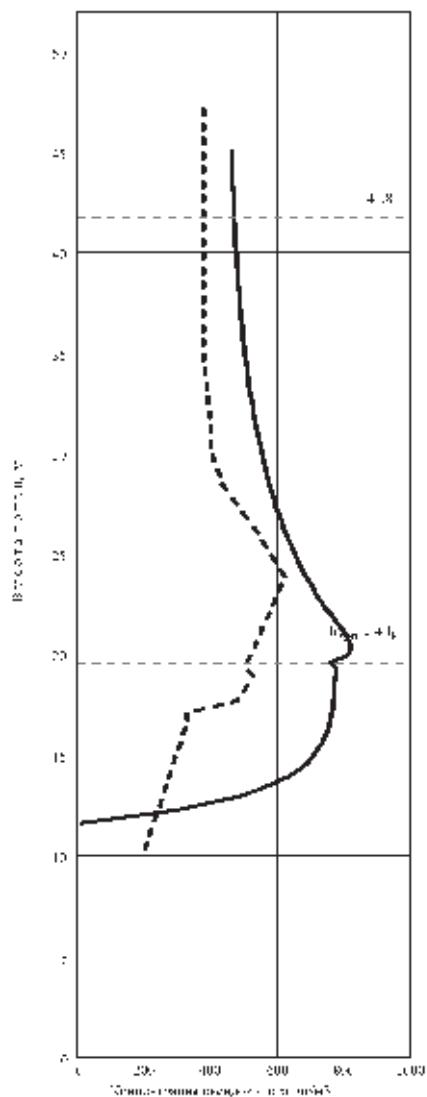


Рис. 5. Изменение концентрации NO_x по высоте топки:
— расчетные данные;
— опытные данные [4]

На котле ТПЕ-214 сотрудниками СибКОТЭС были проведены опыты, результаты которых опубликованы в [5, 6]. Профиль температур по высоте топки, рассчитанный по зависимости (6), по характеру изменения совпадает с профилем, полученным в ходе опытов (рис. 4), однако реальные температуры факела оказались ниже

расчетных. Это объясняется тем, что в опытах подача пыли в топку производилась с помощью инертных сушильных газов, а также тем, что при расчете учтена подача первичного топлива через один основной ярус горелок. Изменение концентрации оксидов азота показано на рис. 5. Отличия в характере образования оксидов азота на начальном участке факела от опытных данных появляются вследствие принятого расчетного механизма образования NO_x .

По результатам опытов [5] суммарный выход оксидов азота составил при одноступенчатом сжигании $800\text{--}900 \text{ mg/m}^3$. С внедрением трехступенчатого сжигания авторам удалось добиться снижения концентрации оксидов азота до $350\text{--}420 \text{ mg/m}^3$.

Расчетное значение концентрации оксидов азота (431 mg/m^3) выше на 15 % усредненного опытного значения (375 mg/m^3) и весьма удовлетворительно (с погрешностью около 3 %) согласуется с верхним пределом результатов замеров (420 mg/m^3). Погрешность объясняется так: время пребывания частиц в топке согласно расчетной модели определяется в предположении, что частицы движутся в потоке со скоростью газов (прямоточный пылеугольный факел). Экспериментальные исследования [5] проведены на котле с тангенциальными горелками, где время пребывания частиц в топке, а следовательно, реагирования их с оксидами азота увеличивается, вследствие чего растет и количество разложившихся NO_x . Погрешность в расчетах вносят и более высокие значения температур в топке, полученные расчетным путем.

Вариантные расчеты и анализ полученных результатов показали, что разработанная методика дает удовлетворительное совпадение с опытными данными и может использоваться при расчетах выбросов NO_x , выборе компоновки горелок, конструкции топочной камеры и параметров топочного процесса (доля, тонкость помола вторичного топлива, избытки воздуха и пр.) с целью достижения максимальной полноты сгорания топлива и повышения эффективности разложения оксидов азота при внедрении ступенчатого сжигания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Померанцев, В.В. Основы практической теории горения [Текст]: Учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; Под ред. В.В. Померанцева.— 2-е изд., перераб. и доп.— Л.: Энергоатомиздат, 1986.— 312 с.
2. Tang, B.G. Computer simulation of NO forma-



tion in pulverized coal combustion [Текст] / B.G. Tang, K. Ohtake // International symposium on coal combustion (7—10 sept. 1987): China, 1987.— S. 1.

3. Тринченко, А.А. Повышение экологических показателей низкотемпературных вихревых топок за счет разложения оксидов азота на коксовых частицах [Текст] / А.А. Тринченко.— Дис. ... канд. техн. наук.— СПбГПУ.— СПб. 2002.— 187 с.

4. Котлер, В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов [Текст] / В.Р. Котлер.— М.: Энергоатомиздат, 1987.— 144 с.

5. Серант, Ф.А. Опыт внедрения трехступенчатого сжигания пыли высокореакционных углей [Текст] / Ф.А. Серант, Л.И. Пугач, К.В. Агапов, А.В. Лымарев // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы использования канского-ачинских углей на электростанциях». 21–23 ноября 2000. Красноярск.— Красноярск, 2000.— С. 287–291.

6. Шатиль, А.А. Подавление эмиссии оксидов азота при ступенчатом сжигании высокореакционных углей [Текст] / А.А. Шатиль, Н.С. Клепиков, Е.К. Вешняков [и др.] // Теплоэнергетика.— 2009.— № 1.— С. 2–8.

УДК 621.311

И.Г. Кудряшева, Ю.А. Мирошникова

О ЗНАЧЕНИИ ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ УКРАИНЫ

В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете на кафедре «Возобновляемые источники энергии и гидроэнергетика» (ВИЭГ) выполняются научные исследования по оптимизации режимов работы гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) в рамках энергосистемы [1–3].

Основными задачами исследований являются:

оптимизация параметров работы энергосистемы;

оценка экономии топлива на тепловых станциях в период работы ГАЭС в пиковом режиме (по сравнению с вариантом использования высокоманевренной тепловой станции с парогазовыми установками (ПГУ));

расчет снижения объема выбросов CO₂ в атмосферу за счет использования ГАЭС;

оценка повышенного износа оборудования и различных потерь вследствие работы ГАЭС в режиме оказания системных услуг;

учет системного эффекта от работы ГАЭС в тарифах на электроэнергию в качестве премиальной надбавки;

формирование и обоснование нового подхода к расчету тарифа на электроэнергию, получаемую от ГАЭС, с учетом затрат станции в штатных режимах и в режимах оказания системных услуг энергообъединению.

Оптимизация работы энергетических систем — одна из важнейших задач, которая должна быть решена для обеспечения качественного бесперебойного электроснабжения потребителей. Рост объема промышленного производства несет риск дестабилизации работы энергообъединения вследствие подключения к сети разнообразной дополнительной нагрузки. Это приводит к увеличению перетоков реактивной мощности, ухудшению уровней напряжения и частоты в энергосистеме. Кроме того, перед энергетиками остро встает вопрос слаживания графика нагрузки энергосистемы. Недостаток маневренных мощностей может привести к сбоям в работе энергообъединения, уменьшению срока службы тепловых станций, а также повышенным расходам на их эксплуатацию. Интенсивное использование высокоманевренных тепловых станций приводит к увеличению выбросов CO₂ в атмосферу и не решает полностью проблему заполнения ночных провалов графика нагрузки энергосистемы.

Генерирующую часть энергобаланса обеспечивают следующие типы энергетических объектов: тепловые электроцентрали (ТЭЦ); атомные электростанции (АЭС); тепловые электростанции (ТЭС); гидроэлектростанции (ГЭС, МГЭС); гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС); электростанции на базе возобновляемых источников энергии (ВЭС, биотопливные станции).

Режимы работ электростанций, входящих в объединенную энергосистему (ОЭС), имеют свои особенности. Анализ многолетнего опыта эксплуатации электростанций Украины позволяет выделить следующие режимы работы генерирующих мощностей в энергосистеме:

покрытие базисной части суточного графика нагрузки наиболее экономично обеспечивается за счет АЭС;

режим работы ТЭЦ определяется тепловой нагрузкой потребителя;

мощность и выработка ТЭС располагается как в базисной, так и в регулируемой части графика нагрузки энергосистемы;

покрытие пиковой части суточного графика нагрузки, как правило, обеспечивается за счет агрегатов ТЭС, ГЭС и ГАЭС (если их мощность достаточна), допускающих частые включения, изменения их загрузки и отключения.

Суммарная установленная мощность всех электростанций энергосистемы Украины (рис. 1) — 52,14 тыс. МВт [1], в том числе: ТЭС — 52 %; ТЭЦ — 11 %; АЭС — 27 %; ГЭС и ГАЭС — 10 %.

Анализ выявил следующие особенности развития энергосистемы Украины:

интенсивное строительство АЭС тормозится из-за проблемы маневренности и автоматизации энергосистемы, так как введенные в эксплуатацию блоки АЭС могут работать только в базовом режиме;

перераспределение долей угля, мазута и природного газа в структуре используемого топлива на ТЭС обусловливает уменьшение маневренности работающих блоков ТЭС;

доля маневренных ГЭС в общем объеме выработки электроэнергии недостаточна из-за ограниченных гидроресурсов и мощностей ГЭС Украины;

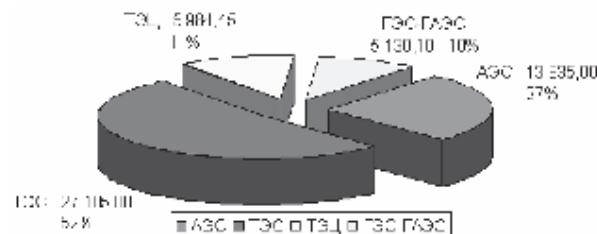


Рис. 1. Структура генерирующих мощностей, МВт, энергосистемы Украины в 2010 году

задержка строительства Днестровской, Каневской и Ташлыкской ГАЭС, которые должны обеспечивать пиковые мощности графика нагрузки, обусловлена недофинансированием, вызванным низкой инвестиционной привлекательностью данных объектов в условиях существующей политики тарифообразования;

блоки ТЭС имеют низкий уровень автоматизации основных и вспомогательных технологических процессов, не работают или отсутствуют главные регуляторы мощности основного технологического паросилового оборудования;

автоматические регуляторы скорости турбогенераторов и частично гидроагрегатов либо отсутствуют, либо морально и физически устарели;

задерживается ввод в эксплуатацию устройств группового распределения активной мощности на ГЭС (завершение проекта реконструкции ГЭС планируется ориентировано на 2023 год);

частично отсутствуют общестанционные системы автоматического управления мощностью на ТЭС.

В фактической годовой структуре баланса выработки доля АЭС превышает суммарную долю ТЭС, ТЭЦ, ГЭС и ГАЭС (47,9 % против 47,5 %). После завершения строительства и введения в эксплуатацию двух блоков АЭС (№ 2 на Хмельницкой и № 4 на Ровенской) базовая мощность энергосистемы дополнительно повысилась, что усложнило процессы регулирования и потребовало значительного увеличения маневренных станций для работы в пиковой и полупиковой зонах графика нагрузки энергосистемы. Для осуществления эффективного регулирования располагаемых мощностей ГЭС, ГАЭС и ТЭС недостаточно. Кроме того, энергоблоки ТЭС работают в условиях ниже порога живучести данного типа станций, что приводит к серьезному возрастанию потребления топлива и увеличению степени износа оборудования.

В настоящее время участие потребителей в регулировании графика нагрузок практически исчерпано. Большинство крупных предприятий с переходом на расчеты за купленную электроэнергию по тарифам, дифференцированным по зонам суток, уже снизили потребление электрической энергии в пиковые часы и увеличили его в ночное время. Более мелким потребителям при действующих тарифах на электроэнергию осуществлять такой переход экономически невыгодно [2].



В 2010 году общий объем потребляемой мощности ОЭС Украины был равен примерно 22,7 тыс. МВт; планируется увеличение этого показателя к 2020 году до 32,8 тыс. МВт, а к 2030-му — до 45,1 тыс. МВт.

На основе анализа энергетической стратегии Украины [4] при условии равномерного распределения приращения потребляемой мощности получен следующий прогноз изменения суммарных объемов этой мощности в ОЭС на 2010–2030 годы:

Год	Мощность, тыс. МВт
2010	22,7
2011	23,4
2012	24,2
2013	24,9
2014	25,6
2015	26,4
2016	27,6
2017	28,9
2018	30,2
2019	31,4
2020	32,7
2021	34
2022	35,2
2023	36,4
2024	37,7
2025	38,9
2026	40,2
2027	41,4
2028	42,6
2029	43,9
2030	45,1

В сложившейся ситуации устойчивое поддержание нормальной частоты в ОЭС Украины — важнейшая организационно-техническая, экономическая и технологическая задача, решение которой — необходимое условие надежного энергоснабжения потребителей, эффективной работы всей отрасли и ее конкурентоспособно-

сти на европейском рынке. В этой связи следует отметить, что при неудовлетворительном регулировании в ОЭС практически невозможна параллельная работа с энергосистемами соседних государств, где требования к точности поддержания частоты очень высоки.

Для обеспечения качественного и бесперебойного потребления и экспорта электрической энергии необходимо увеличить мощность генерирующих электростанций (с учетом мощностей, находящихся в резерве и ремонте) до уровня 89,5 тыс. МВт (рис. 2).

Энергетическая стратегия Украины предусматривает балансировку энергетической системы за счет снижения доли генерации ТЭС и строительства трех ГАЭС: Днестровской (крупнейшая в Европе), Ташлыкской и Каневской [4].

В настоящее время строительные работы на всех трех ГАЭС приостановлены из-за недостаточного финансирования. Очевидно, что при заданных в стратегии объемах строительства новых объектов атомной и тепловой (топливной) генерации и остановке строительства упомянутых гидроэнергетических объектов график нагрузки энергосистемы будет характеризоваться большой неравномерностью и возрастанием нагрузки на ТЭС, что приведет к увеличению затрат на топливо, ускоренному старению блоков станций, повышенным выбросам парниковых газов в атмосферу.

Наряду со сглаживанием графика нагрузки системы, ГАЭС привлекаются в процессы регулирования частоты и мощности в энергосистеме. Анализ данных о работе ряда станций Днепровского каскада показал, что переход гидроагрегатов к работе в режиме АРЧМ (автоматического регулирования частоты и активной мощности) сопряжен с необходимостью дополнительных расходов материально-технических

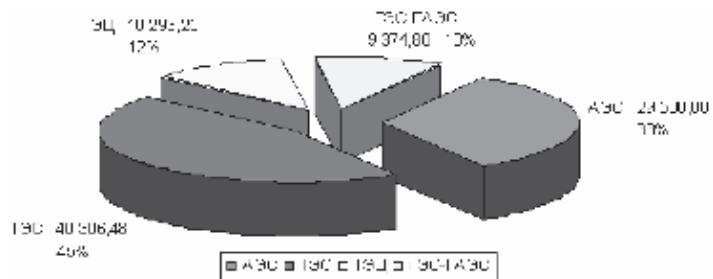


Рис. 2. Структура генерирующих мощностей, МВт, в 2029 году

и финансовых ресурсов, связанных с потерями воды, восстановлением ресурса гидроагрегата и его вспомогательных систем, расходами электроэнергии на работу компрессоров и насосов. Кроме того, работа гидроагрегатов происходит в условиях постоянных переходных режимов, что существенно снижает ресурс оборудования.

Результаты сбора и анализа данных о работе гидроагрегатов в режиме синхронного компенсатора (СК) — одной из важнейших системных услуг, оказываемых гидроэлектростанциями и ГАЭС энергосистеме — показали снижение срока службы гидроагрегатов на 57 %, что соответственно приводит к повышению эксплуатационных затрат. Тем не менее к работе в режиме АРЧМ выгоднее привлекать ГЭС и ГАЭС, чем ТЭС. Это лишний раз подтверждает высокую эффективность работы гидроагрегатов в энергосистеме и доказывает необходимость внедрения гидроэнергетических объектов данного типа.

Для увеличения доли ГАЭС в регулировании частоты и активной мощности в ОЭС Украины необходим следующий комплекс мероприятий:

техническое перевооружение действующих агрегатов ГАЭС с выполнением всех нормативных требований по их участию в первичном и вторичном регулировании частоты и перетоков мощности; разработка и финансирование необходимых для этого мероприятий;

ввод новых мощностей (завершение строительства Днестровской и Ташлыкской ГАЭС, строительство Каневской ГАЭС);

оснащение строящихся гидроаккумулирующих электростанций средствами автоматического регулирования частоты и перетоков мощности;

внедрение в практику регулирования частоты и перетоков мощности в ОЭС Украины средств и методов, используемых в странах с регулированием по стандартам UCTE (Union for Coordination of Transmission of Electricity), при максимальном сохранении и развитии отечественного опыта иерархических систем АРЧМ в условиях конкурентного рынка;

разработка методов экономического стимулирования ГАЭС в соответствии с действующими Правилами оптового рынка электрической энергии, а также оценка снижения ресурса оборудования электростанций при таком режиме их использования [5].

Для качественного участия ГАЭС в регулировании частоты и активной мощности ОЭС

Украины требуется серьезные капиталовложения. Решение этой проблемы правительство Украины видит в открытии кредитной линии совместно с крупнейшими международными и европейскими финансовыми организациями, такими как Международный банк реконструкции и развития, Европейский банк реконструкции и развития, Европейский инвестиционный банк, различные гранты японского и швейцарского правительства («зеленые инвестиции»).

Средства, взятые в кредит на строительство ГАЭС, планируется возвращать за счет будущих доходов, ожидаемых в результате пересмотра системы формирования тарифа — в него будет заложена кредитная составляющая. Зарубежные финансовые организации заинтересованы в получении максимальной отдачи на вложенные инвестиции. Главной задачей Правительства Украины по привлечению средств МФО (международные финансовые организации) является планомерная работа в области повышения инвестиционной привлекательности объектов ГАЭС. Новый тариф должен учитывать специфику работы ГАЭС, системные услуги, оказываемые энергосистеме, положительный эффект участия ГАЭС в регулировании, а также стимулировать укрепление позиций гидроаккумулирования в балансировке графика нагрузки системы [6].

Пересмотр и корректировка тарифной политики по отношению к ГАЭС приведет к улучшению экономических показателей и повышению инвестиционной привлекательности гидроаккумулирующих станций. Это позволит привлечь к строительству станций частный капитал и разгрузить часть статей бюджетных затрат энергодефицитных регионов [3].

В рамках нашей работы для оценки влияния работы ГАЭС на энергосистему была разработана программа в программной среде MS Excel, с помощью которой на основе вводимых параметров, характеризующих работу изучаемого энергообъединения, можно рассчитать снижение выбросов CO₂, снижение потребления топлива на тепловых станциях, экономический эффект от сглаживания графика нагрузки системы, а также визуализировать результаты оптимизации работы энергообъединения после внедрения в его структуру мощностей ГАЭС. Применение данного программного продукта позволит оптимизировать параметры проектируемых ГАЭС



в соответствии с особенностями структуры и функционирования энергетических систем, где данные объекты будут внедряться.

На данном этапе программа позволяет пользователю вносить и анализировать следующую информацию о рассматриваемом энергообъединении:

данные о структуре генерации и объемах потребления электроэнергии;

характеристики тепловых станций (тип потребляемого топлива, удельный расход топлива в зависимости от типа станции, удельные объемы выбросов CO₂ при сжигании различного вида топлива и т. д.)

характеристики внедряемого объекта.

На основе анализа этих данных программа строит среднесуточный график работы энергосистемы, что позволяет более наглядно оценить структуру энергетической системы и степень неравномерности графика нагрузки. Исходя из

данных о характеристиках различных видов топлива, используемого ТЭЦ и ТЭС, программа определяет не только изменения выработки ТЭС и АЭС, но и суммарную годовую экономию средств за счет снижения потребления топлива. Кроме того, программа позволяет оценить согласно нормам Киотского протокола снижение выбросов CO₂ (в количественном и денежном эквивалентах) в результате внедрения ГАЭС в работу энергообъединения. После окончательной доработки и усовершенствования программы предполагается ее использование для инициации и создания технико-экономического обоснования проекта строительства Каховской ГАЭС.

Данные исследования выполняются при поддержке Госконтракта 02.740.11.0750 по Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев, Ю.С.** Обоснование параметров и эффективности гидроаккумулирующих станций [Текст] / Ю.С. Васильев, В.В. Елистратов, И.Г. Кудряшева // Труды СПбГТУ.— № 502. Строительство.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007.— С. 146–154.
2. **Кудряшева, И.Г.** Методические аспекты оценки эффективности гидроаккумулирующих станций [Текст] / И.Г. Кудряшева // Матер. междунар. научно-техн. форума «Электроэнергетика-2008». 15–19 сентября.— СПб.: Изд-во ПЭИПК, 2009.—
- С. 352–358.
3. **Мирошникова, Ю.А.** Оценка системного эффекта ГАЭС в энергосистемах [Текст] / Ю.А. Мирошникова, И.Г. Кудряшева // XXXIX Неделя науки СПбГПУ. Матер. н.-т. конф.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010.— С.102–103.
4. Энергетическая стратегия Украины на период до 2030 года. Распоряжение кабинета министров Украины №145-р от 15.03.06.
5. <http://www.er.gov.ua>
6. <http://www.uge.gov.ua>

УДК 621.311.22(075.8)

В.Г. Киселев

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННЫХ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Постановка проблемы

С развитием городов и повышением плотности застройки опережающими темпами растет количество подземных металлических сооружений (ПМС), расположенных в непосредственной близости от источников постоянных блуж-

дающих токов, например трамвайных, железнодорожных и троллейбусных линий. Сохранение инвестиций, сокращение потерь при аварийном выходе из строя ПМС, расположенных в зоне влияния блуждающих токов, в значительной степени определяются уровнем анткоррозионной

защиты. Рассмотрению основных направлений совершенствования системы антикоррозионной защиты от блуждающих токов ПМС и посвящена данная статья.

Механизм коррозионного разрушения ПМС под воздействием блуждающих токов

Под блуждающим током понимают ток, который стекает с токоведущих частей электрических устройств в окружающую среду и возвращается в это же устройство в другом месте. Различают постоянные и переменные блуждающие токи. В данной работе мы остановимся исключительно на рассмотрении постоянных блуждающих токов, протекающих в грунте или водной среде, которые, как известно, являются электролитами.

Связь между количеством прореагировавшего вещества в электрохимической системе и электрическим током определяется законом Фарадея. В соответствии с этим законом для растворения одного грамм-эквивалента металла требуется один Фарадей электричества. Закон Фарадея обычно записывают в следующей форме:

$$\Delta m = \frac{1}{F} \frac{M}{z} It, \quad (1)$$

где Δm — масса (потеря массы); F — постоянная Фарадея; M — масса моля вещества; z — валентность иона; I — ток, текущий через электрохимическую систему; t — время.

Для нас более информативны следующие формы записи закона Фарадея:

$$v = \frac{\Delta m}{At} = \frac{M}{zF} i_A, \quad (2)$$

или

$$w = \frac{v}{\rho_s}, \quad (3)$$

где v — потеря массы вещества, отнесенная к единице поверхности металла, за единицу времени; A — площадь поверхности металла; i_A — плотность анодного тока; ρ_s — удельная плотность металла; w — скорость коррозии металла, выраженная в единицах длины, за единицу времени.

Расчеты с использованием этих формул для железа показывают, что при плотности анодного тока, равной 1 A/m^2 , скорость коррозии приблизительно составляет

$$v = 9,1 \text{ кг / м}^2 \text{ год}; w = 1,12 \text{ мм/год} \\ (\text{что соответствует } 1,2 \text{ дм}^3/\text{год}) \quad (4)$$

По оценке Бэкмана с соавторами [1] этого может быть достаточно для образования 1000 сквозных повреждений на трубопроводе в течение года. Известно, что токи, текущие в рельсовых путях, и других источников постоянных блуждающих токов иногда составляют 1000 А и более. Следовательно, выход из строя ПМС, не обеспеченных эффективной защитой от воздействия постоянных блуждающих токов, может происходить буквально в течение нескольких месяцев после прокладки коммуникаций, что и наблюдается на практике при наличии активных источников постоянного тока и недостаточной эффективности антикоррозионных мероприятий.

Все это требует разработки и применения специальных методов по защите от коррозии, вызванной постоянными блуждающими токами. Однако, прежде чем перейти к рассмотрению собственно этих методов, остановимся на краткой характеристике источников блуждающих токов.

Источники блуждающих токов

К источникам блуждающих токов обычно относят:

установки катодной защиты;
системы передачи информации, использующие в качестве второго провода «землю»;
линии электропередачи постоянного тока;
предприятия, применяющие в технологии источники постоянного тока (сварочное производство с использованием постоянного тока, электролизное производство и т. д.);

протяженные коррозионные элементы, в зоне действия которых расположены сторонние подземные (подводные) металлические сооружения;
транспорт, использующий двухпроводные системы постоянного тока, например троллейбус;
транспорт, использующий постоянный ток, который протекает через рельсовые пути (метро, железнодорожный транспорт, трамвай с приводом на постоянном токе).

При этом их можно разделить на две неравнозначные группы: на источники постоянного тока, имеющие два и более контакта с землей при их нормальной работе (например, трамвайные линии, использующие постоянный ток), и источники, имеющие один контакт с землей или вообще не имеющие его при нормальной работе. В последнем случае (например, на отдельных ти-



пах подъемных кранов, применяющих постоянный ток) образование буждающих токов может наблюдаться только в аварийных ситуациях.

Основные мероприятия по защите ПМС от коррозии буждающими токами

Уменьшение отрицательного влияния буждающих токов на ПМС при заданных параметрах окружающей среды может достигаться в основном за счет следующего:

- мероприятий собственно на источниках буждающих токов;
- мероприятий на ПМС;
- установки дренажных устройств различных типов;
- рационального проектирования.

Рассмотрим их более детально, в первую очередь — мероприятия по сокращению величины буждающих токов, осуществляемые на их источниках и направленные на следующее:

снижение разности потенциалов токоведущих частей источника (источников) постоянного тока, электрически связанных между собой и контактирующих с грунтом (например, выравнивание потенциалов отрицательных шин тяговых подстанций трамвайного пути);

уменьшение продольного сопротивления токопроводящих частей источников постоянного тока, контактирующих с грунтом (например, продольного сопротивления рельсов железнодорожного транспорта путем применения сварных стыков, продольных и поперечных перемычек и т. д.);

мероприятия по повышению переходного сопротивления «токоведущая часть источника (источников) постоянного тока — грунт» (использование высококачественного балласта, диэлектрических прокладок, пропитка деревянных шпал антисептиком, с высоким удельным электрическим сопротивлением, водоотвод и т. д.);

мероприятия по отделению токопроводящих частей источников постоянного тока от других металлических сооружений, электрически связанных с грунтом, — установка изолирующих стыков на рельсовых путях при переходе от тепловозной тяги к тяге электрической; установка искровых пробойников, при технической необходимости использование заземляющих устройств и т. д.

Первые два типа мероприятий сокращают величину буждающих токов за счет уменьшения разности потенциалов, приложенных к раз-

личным точкам грунта. В свою очередь, последние два типа мероприятий увеличивают переходное сопротивление «источник постоянного тока — грунт» и тем самым способствуют уменьшению величины буждающих токов.

Мероприятия на подземных металлических сооружениях, сокращающие величину буждающих токов, протекающих в них, можно классифицировать следующим образом:

использование бездефектного высококачественного электроизоляционного покрытия ПМС, сохраняющего свои высокие как механические, так и диэлектрические свойства в процессе строительства и эксплуатации;

мониторинг состояния изоляции ПМС в процессе производства компонентов для них, а также в процессе строительства и эксплуатации подземного металлического сооружения и своевременное устранение дефектов изоляции, прежде всего с использованием высококачественных диэлектрических материалов;

осуществление мероприятий, уменьшающих механическую нагрузку на покрытие и тем самым способствующих уменьшению количества дефектов в нем, например путем использования песчаной подсыпки, защитных матов и т. д.;

повышение удельной электропроводности грунта в зоне расположения ПМС, например путем отвода грунтовых и дождевых вод, за счет использования электроизолирующих защитных матов, нейтрализации кислых почв и т. д.;

использование специальных методов прокладки ПМС (прокладка в туннелях, коллекторах и т. д.) и качественная эксплуатация сооружений подобного типа (отвод грунтовых вод из туннелей, борьба с заиливанием и др.);

мероприятия по катодной защите ПМС наложенным током. Они обычно осуществляются только при наличии высококачественной диэлектрической изоляции и, как правило, сопровождаются ограничением защитной зоны трубопровода путем установки электроизолирующих фланцев.

мероприятия по катодной гальванической защите ПМС (обычно используются только на ПМС небольших размеров и в сочетании с диодными блоками и то крайне редко);

установка заземляющих устройств; применяются при защите от мощных постоянных буждающих токов, мало изменяющихся по своей величине, например для предотвращения повреждений подземных коммуникаций электро-

Критерии опасности коррозии

под воздействием постоянного блуждающего тока и выбор методов защиты

лизных предприятий. В случае одновременного использования электрохимической защиты наложенным током и заземляющих устройств для повышения эффективности катодной защиты заземляющие устройства часто применяют совместно с ограничительными ячейками либо изготавливают из металлов или сплавов со значениями стационарного потенциала в грунте, равными 0,85 В и менее по неполяризующемуся медно-сульфатному электроду сравнения.

К третьей группе мероприятий, направленных на уменьшение величины блуждающих токов, мы отнесли установку дренажей (прямой, поляризованный и усиленный дренажи). Проектирование и строительство дренажных устройств при правильном их применении — весьма эффективный метод защиты от блуждающих токов. Однако наряду с защитной функцией конкретного подземного металлического сооружения, к которому они подключаются, дренажи несут в себе и потенциальную опасность для других коммуникаций, расположенных в данном районе. Это объясняется тем, что при установке дренажа происходит резкое уменьшение сопротивления в цепи «выход источника блуждающего тока — грунт — вход ПМС — выход ПМС — грунт — вход источника блуждающего тока», прежде всего на участке «выход ПМС — грунт — вход источника блуждающего тока». Данное мероприятие в свою очередь стимулирует рост блуждающих токов в зоне выхода с их источника и повышенную коррозионную опасность для ПМС, расположенных в данном районе.

К четвертой группе мероприятий, направленных на уменьшение величины блуждающих токов, можно отнести рациональное проектирование. Под рациональным проектированием обычно понимают цикл мероприятий, осуществляемых на этапе изыскательских работ и собственно в процессе проектирования, в результате которых мы должны получить проект ПМС с оптимальными характеристиками. Оптимизация должна учитывать как технические функции, для реализации которых собственно и создается объект, так и способность ПМС противостоять агрессивному воздействию окружающей среды. Критерием эффективности проектного решения, включающего и антикоррозионные мероприятия, должна служить стоимость строительства и эксплуатации объекта, рассчитанная на весь срок его службы.

Необходимость использования мероприятий, защищающих от воздействия постоянных блуждающих токов как существующие ПМС, так и проектируемые определяется в соответствии с п. 4.7 ГОСТ 9.602 — 2005 [2]. В нем указано, что «опасным влиянием блуждающего постоянного тока на сооружения является наличие изменяющегося по знаку и значению смещения потенциала сооружения по отношению к его стационарному потенциалу (знакопеременная зона) или наличие только положительного смещения потенциала, как правило изменяющегося по значению (анодная зона). Метод определения опасного влияния блуждающего постоянного тока приведен в приложении Г». В соответствии с этим приложением определяется смещение потенциала ПМС относительно его стационарного потенциала, измеренное по медно-сульфатному неполяризующемуся электроду сравнения. Смещение признается опасным, если оно составляет 0,04 В и более. В примечании к этому пункту читаем: «для вновь проектируемых сооружений (кроме сооружений связи) опасным является наличие блуждающих токов в земле, определяемое в соответствии с приложением Д». Данное приложение указывает максимально возможный градиент потенциала в грунте, который допустим при наличии блуждающих токов. Он составляет 0,04 В/100 метров при измерениях, проводимых относительно двух медно-сульфатных электродов сравнения. Эти измерения проводятся на протяжении всей проектируемой трассы через каждые 1000 метров.

При этом необходимо подчеркнуть, что это — далеко не единственные критерии необходимости защитных мероприятий от вредного воздействия постоянных блуждающих токов. Так, например, DIN EN 50162 определяет при использовании низколегированной стали величину возможного смещения поляризационного потенциала как с омической составляющей, так и без нее в анодном направлении для ПМС без катодной защиты, которая зависит от сопротивления грунта. Это смещение представлено в таблице.

При этом следует подчеркнуть, что требования наших нормативных документов, в отношении смещения потенциала в анодном направле-



**Возможное смещение потенциала ΔU в положительном направлении
для ПМС без катодной защиты**

Материал ПМС	Удельное сопротивление грунта, Ом	Максимальный сдвиг потенциала в положительном направлении ΔU , мВ, с очищенной составляющей	Максимальный сдвиг потенциала в положительном направлении ΔU , мВ, без очищенной составляющей
Низкокоррозионная сталь	≥ 200	300	20
Низкокоррозионная сталь	от 15 до 200	1,5·ρ	20
Низкокоррозионная сталь	<15	20	20

нии не зависят от сопротивления грунта и по своей силе приблизительно равны требованиям европейских норм.

Законодатель, не определяя конкретный вид коррозионной опасности, следующим образом постулирует виды защиты от коррозии ПМС (раздел 5, пункт 5.1): «При определении метода защиты от коррозии сооружений предусматривают: выбор защитных покрытий; выбор вида электрохимической защиты; ограничение буждающих токов на их источниках».

В то же время применение электрохимической защиты в соответствии с ГОСТ 9.602–2005 при наличии буждающих токов обязательно. В пункте 5.13 читаем: «Катодная поляризация осуществляется с применением средств электрохимической защиты: катодных установок, поляризованных и усиленных дренажей, гальванических анодов (протекторов).

Катодные установки и гальванические аноды применяют ... при защите от коррозии буждающими постоянными токами.

Поляризованные и усиленные дренажи применяют при защите от коррозии, вызываемой буждающими токами рельсового транспорта, электрифицированного на постоянном токе».

Для стальных трубопроводов, прокладываемых непосредственно в земле в пределах территорий городов, населенных пунктов и промышленных предприятий, пассивная защита обязательна. В то же время в соответствии с ГОСТ 9.602–2005 наличие постоянных буждающих токов не оказывает никакого влияния ни на конструкцию защитных покрытий, ни на требования, предъявляемые к ним как в процессе их нанесения, так и при их последующей эксплуатации.

Что же касается такого метода защиты от коррозии, как ограничение буждающих токов на их источниках, то на его рассмотрении мы остановимся в следующем разделе.

**Требование к анткоррозионной защите
при наличии опасности коррозии
от постоянных буждающих токов
и оценка эффективности
анткоррозионных мероприятий**

Как мы уже отмечали, наличие буждающих токов никоим образом не сказывается на требованиях к пассивной защите, в отношении же электрохимической защиты и ограничении буждающих токов на их источниках требований достаточно много и они весьма разнообразны. Остановимся на них несколько подробнее.

Общие требования к электрохимической защите для ПМС представлены в разделе 7 ГОСТ 9.602–2005, а требования к электрохимической защите при наличии опасного влияния постоянных буждающих токов — в подразделе 7.2. В соответствии с п. 7.2.1: «Защиту сооружений от опасного влияния постоянных буждающих токов осуществляют так, чтобы обеспечивалось отсутствие на сооружении анодных и знакопеременных зон».

Допускается суммарная продолжительность положительных смещений потенциала относительно стационарного потенциала не более 4 минут в сутки.

Определение смещений потенциала (разность между измеренным потенциалом сооружения и стационарным потенциалом) проводят в соответствии с приложением Г». Подпункты 7.2.2 и 7.2.3 относятся к частным случаям «тре-

бований» и в целях экономии места без ограничения общности мы на них останавливаются не будем.

Кроме того, законодатель при рассмотрении требований к конкретным видам катодной защиты (протекторная защита) также учитывает фактор наличия постоянных блюжающих токов. Так, в соответствии с п. 7.7.1: «Зашиту гальваническими анодами (протекторами) применяют в грунтах с удельным сопротивлением не более 50 Ом·м:

для отдельных участков трубопроводов небольшой протяженности ... при наличии опасности блюжающих постоянных токов, если вызываемое ими среднее значение потенциала от стационарного не превышает плюс 0,3 В ...».

Этот пункт — весьма спорный, так как находится в некотором противоречии пункту 4.4.2.5 DIN 57150/VDE 01550, в котором утверждается неприменимость гальванических анодов для защиты от постоянных блюжающих токов, генерируемых рельсовыми транспортными средствами, работающими на постоянном токе, и некоторым другим нормативным документам.

Что же касается требований к дренажной защите, то они изложены в разделе 7.8 ГОСТ 9.602—2005, и нам кажется самоочевидным, что использование данного вида защиты возможно только в случае опасности коррозии, вызываемой постоянными блюжающими токами. Поэтому как изложенные в этом разделе «требования», так и действия по контролю эффективности электрохимической защиты (прежде всего дренажной) совместно с контролем работы установок электрохимической защиты (в первую очередь дренажной защиты) сводятся к набору конструктивных и организационных мероприятий, обеспечивающих безусловное выполнение пункта 7.2.1 ГОСТ 9.602 — 2005.

Подчеркнем, что законодатель специальным образом выделяет блюжающие токи, генерируемые установками катодной защиты. При этом он совсем не требует их сокращения, как делает это, например, по отношению к блюжающим токам рельсового транспорта, работающего на постоянном токе, или по отношению к блюжающим токам, генерируемым промышленными предприятиями, потребляющими постоянный электрический ток в технологических целях. Действительно, напомним пункт 7.6 ГОСТ 9.602—2005: «Катодную поляризацию подземных металлических сооружений осуществляют так,

чтобы она не влияла на соседние подземные металлические сооружения.

Если при осуществлении катодной поляризации возникает вредное влияние на соседние металлические сооружения, необходимо принять меры по устранению или провести совместную защиту этих сооружений.

Примечание. Вредным влиянием катодной поляризации защищаемого сооружения на соседние металлические сооружения считают:

уменьшение по абсолютной величине минимального или увеличение по абсолютной величине максимального защитного потенциала на соседних металлических сооружениях, имеющих электрохимическую защиту;

появление опасности коррозии на соседних подземных металлических сооружениях, ранее не требовавших защиты от нее ...».

Как четко показывает этот пункт, в рамках этого ГОСТ нет необходимости совершенствовать пассивную защиту прежде всего в отношении повышения диэлектрических и механических характеристик защитного покрытия и проводить другие мероприятия по сокращению защитного тока при осуществлении катодной поляризации ПМС.

Требования к ограничению токов утечки на источниках блюжающих токов (мероприятия собственно на источниках блюжающих токов) приведены в разделе 8 ГОСТ 9.602—2005. Здесь законодатель рассматривает определенные технические действия, направленные на уменьшение величины блюжающих токов. Они, эти действия, ориентированы на конкретные виды источников, а именно: на электрифицированный рельсовый транспорт постоянного тока; линии электропередачи постоянного тока системы «провод — земля»; промышленные предприятия, потребляющие постоянный электрический ток в технологических процессах. Остановимся на их рассмотрении несколько подробнее.

Раздел 8.1 ГОСТ 9.602—2005, касающийся электрифицированного рельсового транспорта постоянного тока, разработан достаточно подробно. Здесь, прежде всего, необходимо выделить пункт 8.1.1: «Контактную сеть электрифицированного рельсового транспорта соединяют с положительной (плюсовой) шиной, а рельсовые пути — с отрицательной (минусовой) шиной тяговой подстанции». Очевидно, что только безусловное выполнение этого пункта дает возмож-



ность в последующем использовать дренирующие устройства как защиту от блуждающих токов. История развития техники знает и противоположное подключение тяговой подстанции к рельсовым путям и контактной сети. Последствия этих экспериментов были катастрофическими по отношению к ПМС, находящимся в районе расположения трамвайных путей.

Остальные пункты данного раздела можно сгруппировать следующим образом:

пункты, способствующие повышению переходного сопротивления «источник постоянного тока — земля», например «рельс — земля»;

пункты, способствующие снижению продольного сопротивления токоведущих частей источников постоянного тока, имеющих контакт с землей;

пункты, способствующие выравниванию потенциалов токоведущих частей источников постоянного тока, имеющих контакт с землей;

пункты, гарантирующие бесперебойную работу других систем источников постоянного тока, например системы автоматического регулирования движением поездов;

пункты, определяющие изложенные выше мероприятия, в специальных условиях, например при прохождении рельсовых путей через туннели.

Раздел 8.3 ГОСТ 9.602–2005, который называется «Линии передачи энергии постоянного тока системы «провод — земля» состоит только из одного пункта 8.3.1: «При проектировании рабочих заземлений линий передач энергии постоянного тока системы «провод — земля» предусматривают мероприятия, исключающие их опасное влияние на подземные сооружения». Таким образом, законодатель требует безусловной защиты ПМС от блуждающих токов, но не ограничивает проектировщика в выборе методов достижения поставленной цели, т. е. это могут быть как мероприятия на источник тока, так и мероприятия на подземных сооружениях, включающие как активную, так и пассивную защиту от коррозии.

Требования ограничения токов утечки на промышленных предприятиях, потребляющих постоянный электрический ток в технологических процессах, представлены в разделе 8.4 ГОСТ

9.602–2005. Они ориентированы на электролизные производства и включают в основном конструктивные мероприятия, способствующие увеличению переходного сопротивления «источник постоянного тока — земля».

Законодатель предусмотрел и контроль выполнения мероприятий ограничения токов утечки (подраздел 8.5 ГОСТ 9.602–2005), однако почему-то только в отношении токов утечки электрифицированного рельсового транспорта.

Интересно подчеркнуть, что ГОСТ 9.602–2005, п. 8.5.4 косвенно требует создания организации (организаций) для осуществления «координации и контроля противокоррозионной защиты подземных сооружений».

Обсуждение материала

В статье проведен краткий анализ и дана классификация методов защиты ПМС от постоянного блуждающего тока в грунте. Осуществлено сравнение критериев необходимости защиты от постоянных блуждающих токов на примере ГОСТ 9.602–2005 и DIN EN 50162. Классифицированы и рассмотрены методы защиты от коррозии постоянными блуждающими токами. На основании этого можно сделать следующие выводы:

ГОСТ 9.602–2005 использует только часть из существующего арсенала методов защиты от коррозии постоянными блуждающими токами;

что же касается критериев необходимости защиты от коррозии постоянными блуждающими токами, рассмотренными в ГОСТ 9.602 – 2005, то в силу их небольших отличий от соответствующих критериев европейских норм целесообразна их унификация;

ГОСТ 9.602–2005 не стимулирует повышение технико-экономической эффективности собственно антикоррозионных мероприятий, в том числе и мероприятий по защите от коррозии постоянными блуждающими токами, что подтверждается отсутствием в нем соответствующего пункта, который существовал в более ранних изданиях данного нормативного документа, и пунктом 7.6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Von Baeckmann W. Messtechnik beim kathodischen Korrosionsschutz [Текст] / W. von Baeckmann [и др.].— Expert Verlag, Germani,— 1992.— S. 9.

2. ГОСТ 9.602–2005. Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные; Общие требования к защите от коррозии [Текст].— М.: Стандартинформ, 2006.

УДК 621.311.24

В.Г. Николаев

МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Энергетическая эффективность ветроэнергетической установки (ВЭУ) или станции (ВЭС) определяется удельной мощностью ветровых потоков и техническим совершенством ВЭУ. Последнее в свою очередь обусловлено проектными техническими показателями ВЭУ и их эксплуатационными характеристиками — технической готовностью (ТГ), вероятностью технических простоев (ТП) из-за регламентного обслуживания и ремонта и пр. Расчет мощности ВЭУ $P_{\text{ВЭУ}}$ в современных методиках ведется по формуле [1, 4]:

$$P_{\text{ВЭУ}}^T = K_{\text{TГ}}^n K_{\text{нид}} (\rho / \rho_0) \times \\ \times \left\{ \int_{V_0}^{V_{\text{бyp}}} p(V) f(V) dV \right\},$$

где $K_{\text{нид}}$ — коэффициент неидеальности ВЭУ, определяемый инерционностью систем управления, неоднородностью обдувки ВК, ветровым экранированием ВЭУ друг другом и окружающими их препятствиями, потерями в сетях ВЭС и пр.; $V_{\text{бyp}}$ — буревая скорость, при которой ВЭУ останавливается во избежание поломок (буревой простой); V_0 — стартовая скорость ветра, ниже которой ВЭУ не работает, $p(V)$ — мощностная характеристика ВЭУ; $f(V)$ — функция плотности распределения ветра по скоростям на высоте оси ВК; ρ_0 и ρ — соответственно стандартная (при нормальных атмосферных условиях) и фактическая плотность воздуха; $K_{\text{TГ}}^n$ — коэффициент ТГ ВЭУ, существенно меняющийся на протяжении эксплуатационного периода.

Максимально достоверный прогноз ТП и ТГ ВЭУ на весь период их эксплуатации принципиально необходим:

для определения мощности и выработки энергии ВЭУ по годам, важного в рыночных условиях как в краткосрочном, так и в многолетнем плане;

для расчета экономического ресурса ВЭС, падающего из-за снижения выработки энергии

и из-за ограниченного (в большинстве стран менее 10 лет) срока льготного ценообразования на энергию ВЭС, по окончанию которого дальнейшая эксплуатация ВЭС может оказаться малорентабельной;

для обоснования оптимальных величин и сроков действия закупочных цен или надбавок за энергию ВЭС;

для определения сроков, после которых затраты на ремонт ВЭС перестают окупаться выручкой с продаж вырабатываемой ими энергии.

Осуществление такого прогноза затруднено рядом причин. В настоящее время наиболее восребоваными и распространенными в мире являются ВЭУ единичной мощности от 2 МВт и более [2], крупное серийное производство и использование которых начато на рубеже 2000-х годов — около 10 лет назад, т. е. не более половины заявляемого для них 20-летнего ресурсного периода. В связи с этим прогноз ТГ ВЭУ большой мощности на вторую половину их работы не обеспечен эксплуатационными данными и обычно делается приближенно исходя либо из неких средних показателей ВЭУ за первые 5–10 лет их работы, либо из статистически обобщенных эксплуатационных характеристик ВЭУ предыдущих поколений мощностью 500–800 кВт, составлявших основу мировой ветроэнергетики в 1990-е годы [5].

Подходы к моделированию многолетней (на протяжении ресурса ВЭУ) динамики частоты и продолжительности ТП ВЭУ, связанных с незапланированными техническими отказами или поломками, требующими ремонта, на основе экспоненциальной модели были ранее изложены автором в [1]. В данной статье изложены результаты дальнейшего развития указанных моделей.

В настоящее время возможности прогноза ТГ ВЭС весьма ограничены в связи с недостатком и ненадежностью информации об их эксплуатационных данных. Известная и доступная информация и данные об эксплуатационных характеристиках ВЭУ следующие:



1. Наиболее достоверный, характеризующий функцию надежности ВЭУ параметр Av (availability) — аналог российского коэффициента технической готовности, определяемый как отношение времени технической исправности ВЭУ к сумме времени ее технической исправности и суммарного времени ТП. Как правило, производители ВЭУ рассчитывают или прогнозируют среднее значение параметра Av_6 после 5 лет их эксплуатации. Для современных ВЭУ номинальной мощности от 1,5–2 МВт и выше он составляет (по данным производителей) 0,97–0,98 [4, 5, 7], а для ВЭУ предыдущих поколений средней мощности (до 800–1000 кВт) — 0,93–0,95 [3, 4, 7]. Значения параметра Av возрастают с техническим совершенствованием ВЭУ [7].

2. Экспертные оценки ведущих мировых производителей среднего за 10 лет значения Av_{10} , используемого при составлении долгосрочных (до 10 лет) договоров на техническую поддержку ВЭС. Исходя из сложившейся практики эксплуатации ВЭУ значения параметра Av_{10} для ВЭУ мощностью от 2 МВт и выше заявляются зарубежными производителями в пределах 0,95–0,96 [3].

3. Факт признания большинством производителей необходимости капитального ремонта ВЭУ после 11–13 лет их эксплуатации [5]. К этому времени вероятность ТП вырастает по данным разных авторов до 9 % и более. Дальнейший ускоряющийся рост вероятности ТП может приводить к недопустимым по длительности простоям и соответственному уменьшению выработки ВЭУ, а также к финансовым затратам на ремонт, не покрываемым далее выручкой от продажи вырабатываемой электроэнергии. Эффективное средство, препятствующее этому и увеличивающее сроки службы ВЭУ, — капитальный ремонт, возвращающий кривую вероятности отказов, или ТП, на достаточно низкий уровень ($\approx 3–5\%$) с последующим после ремонта ее экспоненциальным ростом примерно с первоначальными параметрами. Сроки капремонта ВЭУ выбираются в соответствии с теорией надежности технических устройств исходя из некого «пределенно допустимого» уровня вероятности ТП, после которого эксплуатация становится чрезмерно рискованной в плане надежности либо стоимости. «Омоложение» ВЭУ в капремонте должно обеспечивать выход на предельный уровень риска к концу ресурсного периода.

4. Факт существенной длительности ТП в первые 1–2 года работы ВЭС, известный в теории надежности как период приработка технического изделия. По данным специалистов в первый год количество отказов ВЭС может достигать нескольких сотен, а вероятность ТП — более 10 % [2]. Однако профилактические и ремонтные мероприятия в этот период приводят к быстрому падению вероятности отказов и простоев ВЭУ до уровня 1–2 % на 2–3-й год их эксплуатации. Практическое следствием этого — установившийся в мировой практике двухлетний гарантийный срок производителя на поставляемые ВЭУ.

5. Данные ветроэнергетических компаний о весьма малых, но конечных ТП (около 40 часов в год, или 0,5 % от рабочего периода) по регламентному обслуживанию ВЭУ на начальном периоде их эксплуатации [5].

Как показывает проведенный автором анализ соотношений известных количественных эксплуатационных показателей ВЭУ Av_6 и Av_{10} , а также рекомендуемых сроков капитального ремонта, ВЭУ относятся к «стареющим» техническим объектам, у которых вероятность ТП возрастает с течением времени.

Многолетний ход повторяемости и длительности ТП ВЭУ определяется плановыми регламентными работами, а также внеплановыми и плановыми (в том числе капитальным) ремонтами при эксплуатации ВЭУ. Регламентные работы требуют периодических (несколько раз в месяц или квартал) остановок ВЭУ общей продолжительностью 0,5–1,5 % от времени эксплуатации, причем частота и время их простоев, а также финансовые затраты при регламентных работах, как следует из данных производителей, примерно постоянны за весь период эксплуатации [5].

Модели роста вероятности ТП ВЭУ $f_{\text{TP}}(n)$, отвечающие свойству «старения», за период их ресурса, равный N лет, необходимо строить на базе функций, нарастающих по времени с ускорением. К таким относятся степенные функции

$$f_{\text{TP}}(n) = an^b \quad (1)$$

и экспоненциальные функции

$$f_{\text{TP}}(n) = \lambda \exp(\omega n). \quad (2)$$

Дополнительными ограничениями на базовые для моделирования ТП функции (1) и (2) вытекают из очевидного условия, в соответствии

с которым вероятности ТП на протяжении ресурсного периода ВЭУ не должны превышать единицу:

$$f_{\text{TP}}(n) < f(20) < 1, \quad (3)$$

а также из условия п. 5:

$$f_{\text{TP}}(n) \geq 0,005. \quad (4)$$

Для удобства математического анализа в работе принято допущение о линейной зависимости значений f_{TP} (1) (вероятности ТП на первом году эксплуатации) и $f_{\text{TP}10}$ (средней вероятности ТП за первые 10 лет эксплуатации) со значением f_{TP} (6) (вероятности ТП на шестом году эксплуатации):

$$f(1) = mf(6) = m(1 - Av_6); \quad (5)$$

$$f_{10} = kf(6) = m(1 - Av_6) = 0,1 \int_{n=1}^{10} f(n) dn. \quad (6)$$

Условия (5) и (6) для функций классов (1) и (2) приводят к трансцендентным характеристическим уравнениям относительно неизвестных b, k, m и ω, k, m :

$$10^{b+1} - 2^{b+1} + 6^b(b+1)(m - 10 \cdot k) = 0; \quad (7)$$

$$e^{10\omega} - e^{2\omega} + \omega e^{6\omega}(m - 10 \cdot k) = 0. \quad (8)$$

Поиск решений уравнений (7) и (8) в данной работе проведен численно по разработанной автором программе. Алгоритм решения построен на методах вариационного анализа многопараметрических математических объектов. Анализ результатов решения уравнений (7) и (8) приводит к следующим выводам:

моделирование вероятности ТП ВЭУ, отвечающее известным эксплуатационным данным и принятым допущениям возможно лишь на базе функций, имеющих согласно условию (4) конечные значения и растущих медленно при малых

значениях аргумента (время) и быстро — при больших его значения. Таким свойством обладают лишь экспоненциальные функции. Использование иных, с более слабым нарастанием, функций, как показывают методические расчеты, не приводит к успеху моделирования;

решений уравнения (7) при ограничениях (3) и (4) ни при каких значениях параметров k и m не существует. Согласно методическому анализу это обусловлено недостаточно быстрым ростом степенных функций при больших n ;

удовлетворить имеющимся эксплуатационным и упомянутым экспертным прогностическим данным при условиях (3) и (4) в соответствии с уравнением (8) возможно в классе экспоненциальных функций (2) и лишь в весьма узких диапазонах параметров, приведенных в табл. 1.

Установленный в работе диапазон параметров модели допускает значительный разброс значений вероятности ТП при разных значениях параметра Av_6 , что иллюстрируют на рис. 1 и 2.

Значение вероятности ТП согласно построенной модели может нарастать на протяжении ресурсного периода примерно с 1 % на 3–4-м году эксплуатации до 75–95 % на 20-м году. Расчитанный по модели коридор максимально и минимально возможных значений вероятности ТП ВЭУ узок на большей части периода эксплуатации, что дает основание использовать при моделировании вероятности ТП средних «коридорных» значений. Основной разброс возможных значений вероятности ТП выпадает на последние 2–3 года эксплуатации ВЭУ. Осредненные за 20 лет модельные значения вероятности ТП ограничены узким диапазоном (18,3–22,5 %). Вероятности ТП в последние годы эксплуатации ВЭУ в соответствии с моделью оказываются в 4–5 раз

Таблица 1

Параметры модели вероятности технических простоеов ВЭУ

Av ₆	α		λ		k		m		Av ₁₀	
	α_{\min}	α_{\max}	λ_{\min}	λ_{\max}	k_{\min}	k_{\max}	m_{\min}	m_{\max}	Av _{10 min}	Av _{10 max}
0,94	0,159	0,195	0,01862	0,02311	1,038	1,066	1,826	1,827	0,930	0,936
0,95	0,184	0,212	0,01401	0,01658	1,057	1,082	1,827	1,828	0,941	0,947
0,96	0,213	0,229	0,01012	0,01114	1,084	1,100	1,831	1,832	0,953	0,956
0,97	0,228	0,244	0,00694	0,00764	1,100	1,117	1,838	1,839	0,963	0,966
0,98	0,233	0,273	0,00389	0,00494	1,105	1,152	1,839	1,840	0,974	0,977

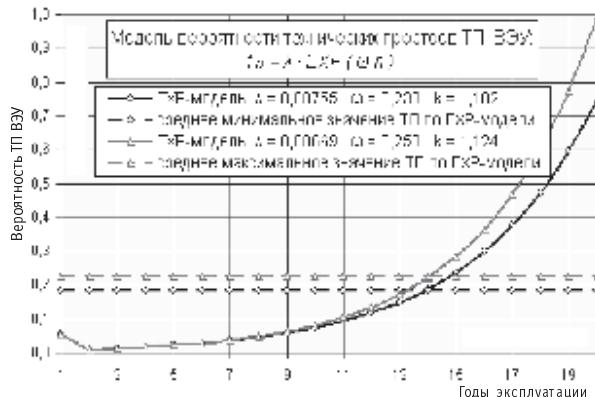


Рис. 1. Диапазон возможных значений вероятности ТП современных ВЭУ при Av_6 0,97

выше средней и в десятки раз выше вероятности на 6-м году эксплуатации. Как видно из рис. 2, с увеличением параметра Av_6 рассчитанный коридор значений вероятности ТП ВЭУ сдвигается в область меньших ее значений, при этом ширина коридора заметно уменьшается.

Таким образом, построенная модель весьма правдоподобно описывает резкое нарастание вероятности ТП на заключительном этапе эксплуатации, характеризующемся на техническом жаргоне как период «рассыпания» машины.

Вероятность ТП на этапе приработки ВЭУ согласно модели варьируется от 11 до 4 % при изменении параметра Av_6 соответственно от 0,98 до 0,94, что также согласуется с известными эксплуатационными данными.

Влияние капитальных ремонтов на результаты моделирования иллюстрирует рис. 3. Численно реализованная модель позволяет варьировать параметры капитального ремонта (год проведения

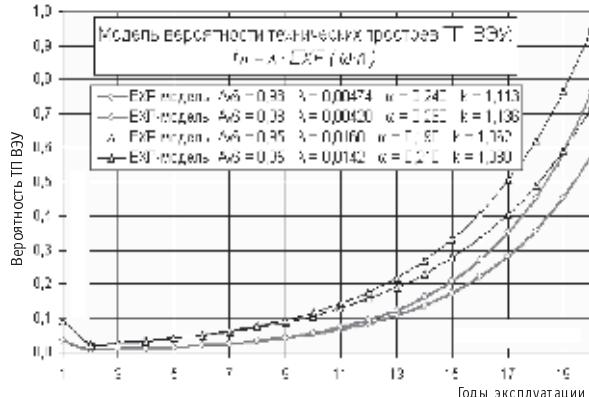


Рис. 2. Диапазон возможных значений вероятности ТП ВЭУ при Av_6 0,95 и Av_6 0,98

и период «омоложения» ВЭУ) в любых разумных пределах. Но с учетом указанных выше соображений и полученных результатов наиболее реальным автор считает проведение капитального ремонта ВЭУ на 12 или 13 году эксплуатации с «омоложением» ВЭУ соответственно на 8 или 7 лет. Согласно модели на 12–13-м году эксплуатации вероятность ТП современных ВЭУ номинальной мощности от 2 МВт и выше (с параметром $Av_6 \approx 0,97$) вырастает до 12–14 %, но капитальный ремонт на 13-м году возвращает указанный параметр к уровню Av_6 . В оставшийся 7-летний период эксплуатации ВЭУ вероятность их ТП вырастает с 3 до 15–16 % (на 20-й год).

Влияние параметра Av_6 на вероятность ТП ВЭУ с капитальным ремонтом иллюстрирует рис. 4. При качественной схожести графиков вероятностей ТП их количественные различия существенным.

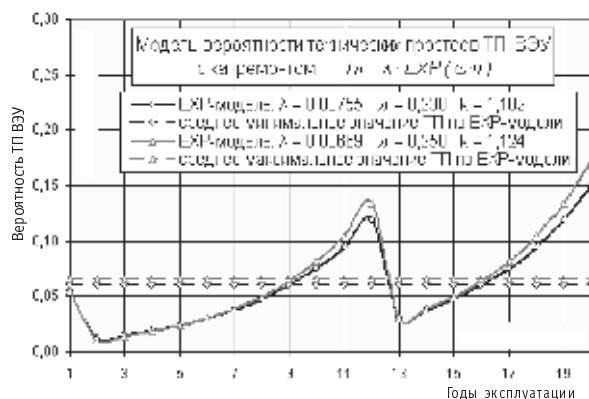


Рис. 3. Диапазон возможных значений вероятности ТП современных ВЭУ при Av_6 0,97

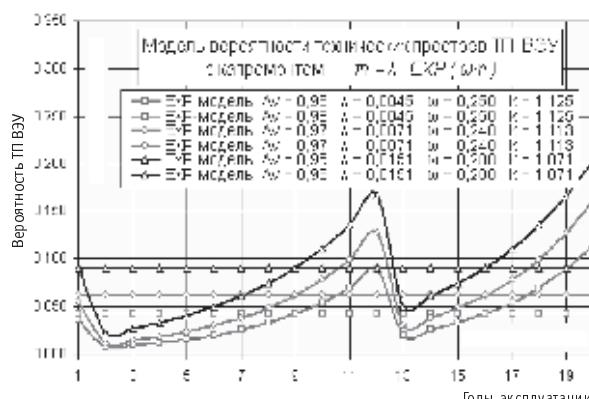


Рис. 4. Диапазон возможных значений вероятности ТП ВЭУ при Av_6 0,95 и Av_6 0,98

Согласно модели для ВЭУ последних поколений (с $A_{V6} \approx 0,98$) предельно установленный уровень ТП снижен до 10 % и менее. Для ВЭУ 90-х годов с $A_{V6} \approx 0,95$ уровень рискованной вероятности составлял, как видно из рис. 4, около 17 %. При этом осредненные за ресурсный период значения вероятности ТП снижены с 9–10 % для ВЭУ с $A_{V6} \approx 0,95$ до 4,5–6,5 % для ВЭУ с $A_{V6} 0,97–0,98$.

Влияние сроков проведения кремонта на результаты моделирования ТГ ВЭУ иллюстрирует рис. 5. Согласно модели затягивание сроков кремонта ВЭУ чревато значительным превышением уровня рискованной вероятности ТП, в результате чего своевременно «не омоложенная» ВЭУ исчерпывает ресурс на 15–16 году эксплуатации. Преждевременное (на 10–11-м году) проведение кремонта ВЭУ представляется нецелесообразным по экономическим соображениям.

На основе результатов моделирования вероятности ТП построены модели технической готовности ВЭУ разных поколений, отличающихся значениями параметра A_{V6} (рис. 6).

Параметры моделей ТГ ВЭУ с кремонтом на 13-м году эксплуатации и их 7-летним «омоложением» приведены в табл. 2.

Как видно из рис. 6 и приведенных в табл. 2 значений, коэффициенты технической готовности в соответствии с моделью могут изменяться в широких пределах за ресурсный период: с 0,98–0,99 на 3–4-м году эксплуатации до 0,83–0,91 на 12-м и 0,2–0,3 на 20-м году. Модельные значения коэффициентов ТГ на 20-м году эксплуатации малы с практической точки зрения. Их малость обусловлена условием (3), которое мо-

жет быть принято более строгим, ограничивающим вероятность ТП на 20-м году эксплуатации ВЭУ не единицей, а меньшим значением, например 0,5. Изменение условия (3) на более строгое, как следует из проведенных в работе методических расчетов, не меняет как методическую суть и численную реализацию развитой модели, так и количественные соотношения получаемых с ее помощью результатов на большей части ресурса ВЭУ. При этом коридоры моделируемых значений вероятности ТП и ТГ на заключительном этапе эксплуатации ВЭУ существенно сужаются.

Рассчитанные по модели коридоры максимально и минимально возможных значений коэффициентов ТГ ВЭУ достаточно узки на большей части периода эксплуатации, что позволяет при моделировании ТГ использовать их средние «коридорные» значения. Погрешности разработанной модели ТГ ВЭУ, исчисленные по ширине коридоров изменения параметров и приходящиеся на 13–14-й год эксплуатации ВЭУ, уменьшаются с ростом параметра A_{V6} и составляют, не более 2,5–3 % для ВЭУ с $A_{V6} 0,95–0,94$ и 1,5–2 % для ВЭУ с $A_{V6} 0,98–0,97$. Осредненные за 20 лет возможные значения коэффициентов ТГ $A_{VCP1-20}$ при варьировании параметра A_{V6} в диапазоне 0,94–0,98 изменяются согласно модели в весьма узком диапазоне — от 0,900 до 0,956.

Как показывает анализ, основным источником неопределенности при расчете коэффициента технической готовности ВЭУ является неточность установления параметра A_{V6} , оценочные значения которого для современных ВЭУ единичной мощностью более 2 МВт даже по данным технических специалистов одной

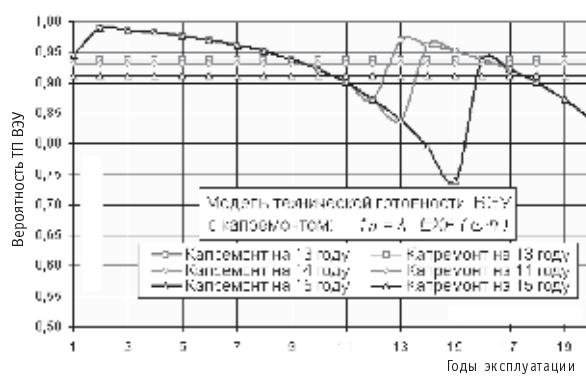


Рис. 5. Диапазон наиболее вероятных коэффициентов ТГ современных ВЭУ при $A_{V6} 0,97$

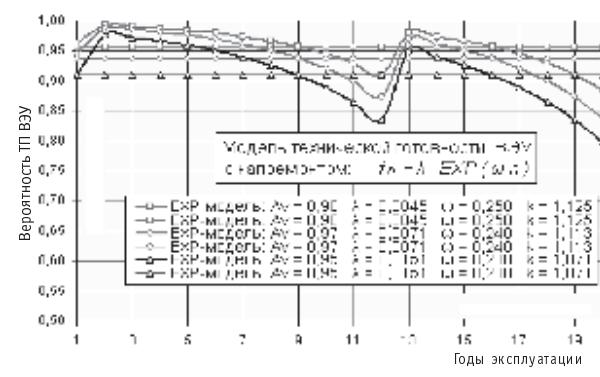


Рис. 6. Диапазон наиболее вероятных коэффициентов ТГ ВЭУ для параметра $A_{V6} 0,95, 0,97$ и 0,9



Таблица 2

Параметры моделей технической готовности ВЭУ с капремонтом

Av_6	α_{t-}	λ_{t-}	k_{t-}	m_{t-}	Av_{t-1}	Av_{t-10}	Av_{t-12}	Av_{t-20}	Av_{t-1-20}
0,94	0,177	0,02087	1,052	1,827	0,890	0,933	0,830	0,312	0,900
0,95	0,198	0,01530	1,070	1,828	0,909	0,944	0,836	0,195	0,911
0,96	0,221	0,01063	1,092	1,832	0,927	0,955	0,849	0,115	0,922
0,97	0,236	0,00729	1,108	1,839	0,945	0,965	0,878	0,208	0,938
0,98	0,253	0,00441	1,129	1,840	0,963	0,976	0,912	0,358	0,956

компании-производителя могут отличаться в весьма существенных пределах. По оценкам автора, точность определения параметра Av_6 для ВЭУ данного класса лежит в диапазоне $0,96 \leq Av_6 \leq 0,975$, при этом точность определения среднего «коридорного» значения коэффициента ТГ ВЭУ ограничивается данными, приведенными в табл. 3. Параметр Av_{10} согласно модели оказывается выше заявляемого в долгосрочных договорах на обслуживание ВЭУ, что объяснимо коммерческими соображениями, требующим определенного «запаса надежности» для компаний, обеспечивающих техническую поддержку ВЭС.

Развитая модель наиболее чувствительна к изменению параметра Av_6 , в связи с чем для повышения удобства ее использования в работе были построены аппроксимирующие зависимости коэффициентов модели от параметра Av_6 , описываемые формулами (9)–(12). Расчет коэффициентов по формулам (9)–(12) обеспечивает их достоверность не менее 0,99.

$$\omega_{cp} - 11,43Av_6^2 + 23,84Av_6 - 12,14; \quad (9)$$

$$\lambda_{cp} 4,794Av_6^2 - 9,613Av_6 + 4,822; \quad (10)$$

$$k_{cp} 0,0974Av_6^2 + 1,734Av_6 - 0,664; \quad (11)$$

$$m_{cp} 2,143Av_6^2 - 3,744Av_6 + 3,452. \quad (12)$$

Прямыми подтверждением достоверности развитой модели могли бы служить эксплуатационные данные о ТП ВЭУ. Но, как показывает информационный поиск, такие данные в известных источниках весьма разрознены, ограничены по объему и представлены, как правило, в обобщенном виде (чаще всего в параметрах коэффициента использования номинальной мощности ВЭУ), не позволяющем выделить ремонтную составляющую ТП ВЭУ. Большинство зарубежных статистических данных об эксплуатационных характеристиках ВЭС публикуются не в технических, а в стоимостных показателях: чаще в себестоимости вырабатываемой ими электроэнергии и реже в многолетних затратах на эксплуатацию и ремонт. Как показывает анализ, некоторые из таких данных при ряде допущений могут быть использованы в качестве аргументов для подтверждения достоверности развитой в работе модели. Одна из таких возможностей основана на использовании приведенных в [7] статистических данных о динамике эксплуатационных затрат ВЭУ разных поколений, отличающихся номинальной мощностью (табл. 4).

Таблица 3

Погрешность определения коэффициента технической готовности ВЭУ последних поколений номинальной мощности более 2 МВт

Показатель	Значения показателя из n-тиго выпуска														
	1	2	3	4	5	6	8	10	12	13	14	16	18	20	々/20
$Av_{MIN} = 0,960$	0,927	0,984	0,980	0,975	0,968	0,960	0,937	0,900	0,842	0,801	0,950	0,921	0,874	0,801	0,912
$Av_{MP} = 0,9675$	0,940	0,987	0,984	0,979	0,974	0,968	0,949	0,919	0,871	0,838	0,959	0,935	0,898	0,838	0,928
$Av_{MAX} = 0,975$	0,954	0,990	0,987	0,984	0,980	0,975	0,960	0,937	0,901	0,875	0,969	0,950	0,921	0,875	0,945
Погрешность, %	1,45	0,31	0,39	0,49	0,61	0,77	1,24	2,02	3,36	4,39	0,98	1,58	2,60	4,39	1,76

Таблица 4

**Многолетний ход среднегодовых затрат на эксплуатацию ВЭУ разных поколений
(в % от капитальных затрат)**

Тип ВЭУ	Годы эксплуатации				
	1–2	3–5	6–10	11–15	16–20
ВЭУ 150 кВт и НС	1,2	2,8	3,3	6,1	7,0
ВЭУ 300 кВт и НС	1,0	2,2	2,6	4,0	6,0
ВЭУ 600 кВт и НС	1,0	1,9	2,2	3,5	4,5
ВЭУ 600 кВт и НС	—	1,88–1,92	2,11–2,26	4,21–4,73	4,42–5,09
ВЭУ 2000 кВт и НС	—	1,87–1,94	2,20–2,33	4,04–4,47	4,44–4,96

Последние две строки в табл. 4 содержат помещенные для сравнения данные (выделены курсивом), рассчитанные по модели автора.

Данные за 1–2 годы эксплуатации ВЭУ не являются показательными, поскольку в силу сложившейся практики на них распространяется гарантия производителя и соответствующие ремонтно-регламентные работы производятся за его счет, а потому не учитываются. Эксплуатационные расходы на ВЭУ с 3-го по 20-й год несут и фиксируют пользователи, что служит гарантией их достоверности.

Анализ приведенных в табл. 4 данных интересен в двух отношениях. Во-первых, эксплуатационные затраты растут с годами по мере выработки их 20-летнего ресурса: осредненные их значения за последнюю пятилетку работы ВЭУ рассмотренных типов в 2–2,7 раз превышают аналогичные за 3–5 год работы. Во-вторых, с развитием ВЭУ (с ростом их номинальной мощности) отношение эксплуатационных затрат к капитальным заметно убывает. Так, ВЭУ мощностью 600 кВт в силу увеличения их надежности почти в полтора раза экономичнее в эксплу-

атации, чем ВЭУ первых поколений (мощностью 100–150 кВт).

Использование приведенных данных для проверки адекватности развитой модели ТГ ВЭУ требует знания структуры эксплуатационных затрат. Для ВЭУ номинальной мощности 600 кВт с характерным значением параметра $A_{V_0} = 0,94$ автором использованы статистические данные работы [8] о структуре эксплуатационных затрат на 4-м году работы ВЭУ, установленных в ЕС (рис. 7).

Согласно данным [8] доля стоимости ремонтов и замены выбывающих элементов ВЭУ на 4-м году работы составляет 12 % от суммарных затрат на содержание. Рассчитанные по данным работы [7] затраты на ремонт и запчасти ВЭУ номинальной мощности 750 кВт и 2 МВт на 4-м году их эксплуатации составляют соответственно 12,5 и 13,1 %. Но согласно данным [4] доля затрат на ремонт ВЭУ растет по мере выработки ресурса и на 10–11-м году составляет для ВЭУ 600 кВт уже около 25–30 % от суммарных затрат на их содержание. При этом суммарная доля остальных составляющих эксплуатационных затрат, как и каждой из них в отдельности, с годами изменяется незначительно (согласно [8] они растут пропорционально инфляции).

Таким образом, ремонтная составляющая, будучи малой долей затрат на эксплуатацию на начальном этапе работы ВЭУ, в силу быстрого нарастания по годам является основным фактором их роста в «зрелом» возрасте ВЭУ.

Установленные закономерности стали для автора основанием для построения функциональной связи стоимости эксплуатации ВЭУ с многолетним ходом вероятности (и продолжительности) технических простоев, определяемых моделью (2). Ввиду ограниченного числа обобщающих данных и их большого разброса у разных авторов (и для разных стран), с одной сто-

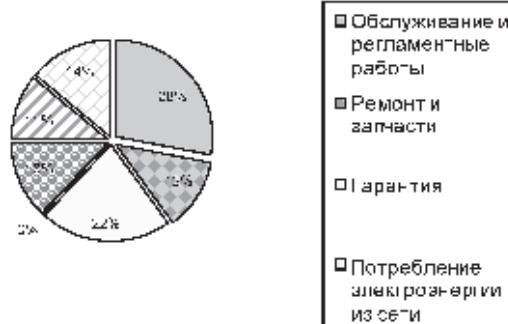


Рис. 7. Структура эксплуатационных затрат ВЭУ 600 кВт на 4-м году работы в ЕС



роны, и наличия многих факторов, влияющих на эксплуатационные расходы, с другой стороны, надежды на построение и само существование правдоподобных моделей искомой связи следуют связывать, по нашему мнению, лишь с наличием достоверных линейных связей ремонтной составляющей эксплуатационных затрат $\mathcal{E}_{\text{з рем}}$ на ВЭУ с вероятностью (продолжительностью) ТП $P_{\text{пп}}$ вида (13):

$$\mathcal{E}_{\text{з рем}} = C_{\text{рем}} \lambda \exp(\omega n), \quad (13)$$

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = C_{\mathcal{E}_3} + C_{\text{рем}} \lambda \exp(\omega n), \quad (14)$$

где $C_{\text{рем}}$ — коэффициент, определяемый с разной погрешностью в зависимости от достоверности используемых в (13) данных. С учетом (13) суммарные годовые эксплуатационные затраты на ВЭУ \mathcal{E}_{Σ} представимы в виде (14), где $C_{\mathcal{E}_3}$ — сумма составляющих эксплуатационных затрат, не связанных с ремонтом, рассчитываемая с учетом инфляционной индексации, типичной для стран ЕС. В настоящей работе в качестве опорных для установления связей (13)–(14) и определения коэффициентов $C_{\text{рем}}$ и $C_{\mathcal{E}_3}$ использованы описанные выше данные об эксплуатационных показателях ВЭУ мощностью 600 кВт. Принципиальными моментами построения достоверных связей (13)–(14) является учет затрат на капремонт, проводимый согласно модели на 12–13 году эксплуатации ВЭУ, а также затраты на обязательный по экологическим требованиям демонтаж ВЭУ после исчерпания ее ресурса к концу 20-го года. Последние согласно имеющимся данным [4, 7] составляют примерно 5–6 % от капзатрат (в данной работе — 5 %).

Оценка стоимости капитального ремонта ВЭУ проведена с учетом его целей, т. е. замены определяющих ресурс элементов. Представление о стоимости основных компонентов дают следующие данные применительно к ВЭУ power MM 92.5 МВт [8]:

Компоненты	Доля, %
Лопасти	22,2
Ступица	1,37
Подшипники	1,22
Поворотный механизм лопастей	2,66
Тормозной механизм	1,32
Редуктор	12,9
Генератор	3,44
Инвертор	5,01
Башня	26,3

Станина	2,8
Поворотный механизм гондолы	1,25
Корпус гондолы	1,35
Главный вал	1,91
Кабель	0,95
Болты и крепеж	1,04
Прочие элементы	14,3
ИТОГО:	100,0

В состав современной ВЭУ входят тысячи элементов, имеющих разный ресурс. Компоненты, потенциально (но не обязательно) подлежащие замене при капремонте, выделены курсивом. По данным производителей ВЭУ [4, 7], наиболее часто заменяются при капремонте подшипники, редукторы, инверторы, тормозные устройства, реже — лопасти и генераторы. С учетом вероятности замены и стоимости наиболее часто заменяемых компонентов и соответствующих работ, стоимость капремонта современных ВЭУ мегаваттной мощности оценивается в 4–7 % от капитальных затрат [4, 7]. В модели затраты на капремонт принимались равными 5 %.

Результаты моделирования связей (13)–(14) по использованным данным, приведенные курсивом в табл. 4, приводят к выводу о качественной и количественной состоятельности предположения о линейной зависимости эксплуатационных затрат на ВЭУ мощностью 600 кВт от вероятности

Таблица 5
Динамика эксплуатационных затрат на ВЭУ
мощности 150 и 300 кВт

Статья затрат	Затраты, €-т/кВт·час	
	в 4-й год	в 10-й год
НЭУ 150 кВт		
Ремонт и обслуживание	0,35	0,36
Ремонт и износ части	0,29	0,49
Гарантия	0,38	0,39
Амортизация	0,19	0,18
Прочие затраты	0,14	1,35
ИТОГО	1,35	1,58
НЭУ 600 кВт		
Ремонт и обслуживание	0,27	0,28
Ремонт и износ части	0,13	0,26
Гарантия	0,27	0,29
Амортизация	0,08	0,09
Прочие затраты	0,07	0,09
ИТОГО	0,82	1,02

их технических простоев, рассчитанных с помощью развитой автором модели (2). Как видно из табл. 4, разброс смоделированных значений относительно средних, обусловленный разбросом использованных при расчетах данных, растет с возрастом ВЭУ 600 кВт от 1,3–3,5 % на 4–10-м году их эксплуатации, но к 16–20-му году не превышает 7–7,5 %. С учетом неопределенности расчета вероятности ТП по модели (2) (не более 4–5 %) максимальная погрешность определения эксплуатационных затрат для ВЭУ 600 кВт на 19–20-м году не превышает 12 %.

Полученное качественное и количественное правдоподобие результатов моделирования эксплуатационных затрат на ВЭУ мощностью 600 кВт свидетельствует в пользу достоверности развитой методики в части моделирования вероятности технических простоев ВЭУ, а также дает основание для ее применения к прогнозированию многолетнего роста эксплуатационных затрат на ВЭУ мегаваттной мощности. Пример результатов такого прогноза для ВЭУ номинальной мощностью 2 МВт при значении ее параметра Av_6 0,97 приведен в табл. 4. Разброс рассчитанных значений эксплуатационных затрат относительно средних, обусловленный неопределенностью использованных при расчетах данных, растет от 1,5 до 3,3 % в первые 10 лет эксплуатации ВЭУ, затем до 5 % к 14–15-му году и остается на этом уровне до выработки ресурса ВЭУ. С учетом возможного разброса расчетных значений вероятности ТП по модели (2) (не более 4–5 % на протяжении ресурсного периода) макси-

мальная неопределенность прогноза эксплуатационных затрат на ВЭУ 2 МВт на 19–20-м году эксплуатации не превышает 8–9 % относительно среднего их значения.

Полученные с помощью модели значения удельных (euro/kВт·ч) эксплуатационных расходов ВЭУ разных годов выпуска и их прогноз на период эксплуатации последних моделей ВЭУ мегаваттной мощности иллюстрирует рис. 8. Согласно модели суммарные эксплуатационные затраты, отнесенные к капитальным затратам, снижались с появлением машин новых поколений (с уменьшением параметра Av_6). Так, для ВЭУ 600 кВт, установленных в середине 1990-х годов, они составляли около 42 % (при росте годовых затрат на эксплуатацию за 20-летний период с 1,37 % до 1,80 %), а для ВЭУ мощностью 2 МВт, установленных в 2004 году, — 35,9 % при $Av_6 = 0,96$ и 29,9 % при $Av_6 = 0,97$ (при росте годовых затрат на эксплуатацию за 20 лет с 0,85 % до 1,30 %). Смоделированное в работе повышение цен на ВЭУ 2005–2006 годов приводит к незначительному росту отношения эксплуатационных затрат к капитальным (до 31,2 %). Полученные результаты хорошо согласуются качественно с известными из мирового опыта представлениями и эксплуатационными данными.

Средние удельные эксплуатационные расходы (в euro/kВт·ч) ВЭУ разных годов выпуска, как видно из рис. 8, с ростом параметра Av_6 от 0,94 до 0,97 уменьшаются согласно модели с 1,04 до 0,92 euro/kВт·ч (до 1,0 euro/kВт·ч с учетом повышения цен на ВЭУ). Удельные эксплуатационные затраты на протяжении 20 лет растут согласно модели с 0,61 (при Av_6 0,94) и 0,49 euro/kВт·ч (при Av_6 0,97) на третьем году работы ВЭУ до 3,77–3,82 euro/kВт·ч к концу их 20-летнего ресурсного периода.

Расчетные значения удельных эксплуатационных затрат занижены примерно вдвое по сравнению с установленвшейся за рубежом практикой заключения договорных цен на долгосрочное (до 10 лет) обслуживание ВЭС. В качестве комментария к такому расхождению отметим, что по ряду отзывов [6, 9] зарубежных специалистов, представляющих производство ВЭУ последних поколения, реальные затраты на их эксплуатацию не превышают 1,0 euro/kВт·ч в первые 6–8 лет работы. Это дает основания полагать, что существование невязки результатов модели со сложившейся практикой обусловлено законами рынка.

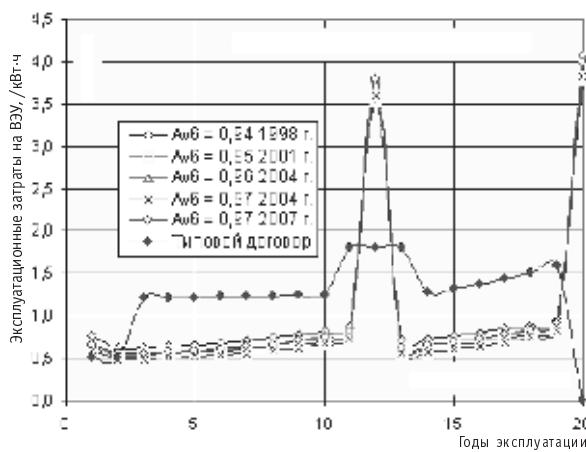


Рис. 8. Рассчитанные по модели удельные эксплуатационные затраты на ВЭУ (euro/kВт·ч)



В заключение в качестве выводов работы по развитию моделей вероятности технических простоев и коэффициентов технической готовности ВЭУ отметим:

математические модели ТП и ТГ современных ВЭУ, адекватные известным для них практическим и прогнозным эксплуатационным данным, удается построить лишь на базе экспоненциальных функций (2) в диапазоне параметров, приведенных в табл. 1;

развитые и представленные в нашей работе модели весьма правдоподобно и с малым коли-

чественным разбросом увязывают известные эксплуатационные данные и обладают при этом достаточной математической гибкостью для дальнейшего уточнения по мере накопления дополнительных данных;

с учетом математической и информационной непротиворечивости и отсутствия более правдоподобных разработанные автором модели могут быть использованы как методическая и практическая основа для определения текущих и прогнозируемых параметров ВЭУ на весь их ресурсный период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Николаев, В.Г.** Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения [Текст] / В.Г. Николаев, С.В. Танага, Ю.И. Кудряшов.— «Атмограф», М., 2008.
2. **Елистратов, В.В.** Использование возобновляемой энергии [Текст]: учебное пособие / В.В. Елистратов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010.— 224 с.
3. **Ackerman, T.** Wind Power in Power Systems [Текст] / T. Ackerman. / Royal Institute of Technology.— Stockholm, Sweeden. 2008.
4. Wind Energy — The Facts. A Guide to the Technology, Economics and Future of Wind Power [Текст] // European Wind Energy Fssotiation (EWEA). Earthscan.— London. 2009
5. Wind Power Technology [Текст] // EWEA. 2004.
6. **Gasch, R.** Wind Power Plants. Fundamentals, Design, Construction and Operation [Текст] / R. Gasch, J. Twele.— Solarpraxis, Berlin - James&James, London. 2002.
7. **Manwell, J.F.** Wind Energy Explained. Theory, Design and Application [Текст] / J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L.Rogers.— University of Massachusetts.— USA.— John Wiley & Sons, Ltd.— 2005.
8. **Krohn, S.** The Economics of Wind Energy [Текст] / S. Krohn, P.-E. Morthorst, S. Averbuch // A Report by the European Enrgy Association. EWEA.— 2009.
9. **Lemming, J.** O&M cost and Economical Lifetime of Wind Turbines [Текст] / J. Lemming, P.E. Morthorst, L.H. Hansen, [и др.] // Proc. EWEC, 2006.
10. **Harrison, R.** Large Wind Turbines. Design and Economics [Текст] / R. Harrison, E. Hau, H. Snel.— John Wiley & Sons Ltd. Chichester New York. 2000.

УДК 621.315.3

Т.И. Карпушина

СЛЮДОСОДЕРЖАЩАЯ ИЗОЛЯЦИЯ НОВЫХ ТИПОВ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ТЕПЛОВОГО СТАРЕНИЯ

Повысить устойчивость к изменениям режимов и возмущениям в сети за счет внедрения частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭ) — одна из основных задач совершенствования электрических машин в России. В составе ЧРЭ требуется применять модернизированные общепромышленные или новые специальные асин-

хронные электродвигатели (АД). Основными факторами, определяющие пагубное воздействие частотно-регулируемого управления на АД, — это пиковое напряжение, приложенное к изоляции первого витка фазы обмотки статора, возникающее при перенапряжениях на концах кабельной линии между автономным инвертором

напряжения и электрической машиной, и частичные разряды (ЧР) в пазовой изоляции обмотки статора [1].

Возрастающие требования по повышению устойчивости изоляции обмоток электрических машин к импульсным нагрузкам и перенапряжениям в сети привели к необходимости существенно повысить кратковременную электрическую прочность витковой изоляции для обеспечения длительного ресурса, пониженных диэлектрических потерь и устойчивости к ЧР. Появление нового типа проводниковой изоляции на основе комбинированных слюдосодержащих пленочных материалов [2–4], а также автоматизация процесса изготовления обмоток статора позволит создать высоковольтные электрические машины с повышенной надежностью. Состав нового типа витковой изоляции статорных обмоток для высоковольтных электрических машин схож с составом корпусной изоляции (наличие диэлектрического барьера из плоских слюдяных частиц, связываемых различными, зависящими от технологических и эксплуатационных условий пропиточными составами и механическими подложками). Новый тип проводниковой и витковой изоляции для высоковольтных электрических машин — это многослойный композиционный материал, состоящий из слюдобумаги, стеклоткани, полиэтилентерафталатной (ПЭТ) пленки и связующего на основе синтетических смол.

Цель представляемой работы — изучение основных электрических характеристик изоляции новых типов обмоточных проводов с пленочной изоляцией из слюдосодержащих материалов до и после теплового старения. Исследование имело в три основных этапа: определение кратковременной и длительной электрической прочности, стойкости к частичным разрядам, измерение диэлектрических потерь до и после теплового старения. Данная работа — важная часть комплексного исследования проводов со слюдосодержащей пленочной изоляцией для их внедрения в серийное производство статорных обмоток электрических машин.

При проведении исследования изоляции использовались образцы промышленных партий обмоточных проводов ПМС и ПМС-М (ОАО «Псковкабель»). Конструкция изоляции провода ПМС состоит из ПЭТ-пленки и ленты Элмикафол 52801 (ОАО ХК «Элинар»), нанесенных

с перекрытием 50 %. В изоляции провода ПМС-М вместо ленты Элмикафол 52801 применяется материал Кондуктофол 0264 («Изовольта», Австрия) с эпоксидным клеевым слоем на поверхности (так называемый, адгезивный слой). Провода ПМС и ПМС-М выпускаются с различной удвоенной толщиной изоляции (например, 0,44, 0,64 и 0,72 мм). Они предназначены для автоматизированного способа производства статорных обмоток. При исследованиях на данном этапе применялись только образцы проводов ПМС/0,44 (ПМС) и ПМС-М/0,44 (ПМС-М), отобранные ранее. Для обеспечения равных условий проведения испытаний использовались идентичные образцы проводов длиной 0,25 м, подготовленные по ГОСТ 15634.4-70.

Для определения электрических характеристик витковой изоляции после термоциклического старения применялись образцы, изготовленные и состаренные специальным образом. Из прямых отрезков проводов длиной 0,25 м были сформированы вертикальные столбики (имитирующие витки в катушке), состоящие из 6 проводов и покрытые вместе антиадгезионным покрытием (фторопластовая пленка). Количество проводов в столбике определялось с учетом усадки заготовки при термопрессовании. Сборные стопки исследуемых проводов разных типов помещались в гидравлический пресс и подвергались длительному циклическому температурному воздействию с поддержанием постоянного удельного давления (не более 3 МПа, чтобы не допустить механического повреждения изоляции).

Перед изучением теплового старения изоляции обмоточных проводов было проведено подробное исследование кратковременной и длительной электрической прочности (основные результаты опубликованы [5]), а также измерение характеристик частичных разрядов.

Определение кратковременной электрической прочности производилось путем пробоя изоляции образцов (длиной 0,25 м, после предварительной термоопрессовки в течение 10 минут при 160 °C) испытательным напряжением переменного тока (50 Гц), повышаемым с заданной скоростью 1,0 кВ/с прибором АИД-70М по ГОСТ 15634.4-70. Для обработки результатов использовались статистические методы анализа данных. Пробивная напряженность изоляции ($E_{\text{пр}}$) провода ПМС (при толщине 0,21 мм) составила $50,6 \pm 5,0$ кВ/мм, у провода ПМС-М — $44,2 \pm 5,0$ кВ/мм.



Исследование длительной электрической прочности проводов марок ПМС и ПМС-М производилось методом линейного повышения испытательной напряженности (с двумя скоростями $\dot{E}_1 = 0,052 \text{ кВ/мм} \cdot \text{с}$, $\dot{E}_2 = 0,815 \text{ кВ/мм} \cdot \text{с}$).

Долговечность изоляции в различных системах характеризуется зависимостью наработки до отказа (или сроком службы) t от средней напряженности электрического поля E . Наиболее распространенная формула, описывающая зависимость наработки до отказа от напряженности электрического поля для различных типов изоляции, включая и слюдосодержащую, — это степенная зависимость

$$t = t_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-m}, \quad (1)$$

где m и t_0 — постоянные; E_0 — произвольно выбранная базисная величина.

С помощью полученных экспериментальных данных произведен расчет показателя степени m уравнения (1) для изоляции обмоточных проводов: для провода ПМС/0,44 $m = 10,6 \pm 0,3$, для ПМС-М/0,44 — $m = 15,1 \pm 0,3$.

Для определения качества изготовления изоляции исследуемых обмоточных проводов использован метод оценки на основе анализа частичных разрядов [6]. С помощью прибора «СКИТ-ЧР» получены амплитудные и амплитудно-фазовые спектры распределений ЧР для

проводов ПМС и ПМС-М и их модификаций, а также изучены зависимости характеристик ЧР от типа применяемого электроизоляционного материала, конструкции изоляции провода и режима термопрессования. Измерения характеристик ЧР включали в себя: измерение среднего тока $I_{\text{ср}}$ и максимального заряда ЧР q_{max} в изоляции образцов в зависимости от времени приложения и величины испытательного напряжения $U_{\text{исп}}$ [7].

Изучение характеристик ЧР изоляции обмоточных проводов производилось с целью определения различных технологических дефектов изоляции. Поэтому на первом этапе изучалось влияние технологической операции конкатенации витков (т. е. кратковременной термоопрессовки столбика витков) на электрические свойства витковой изоляции. Были взяты две группы образцов проводов ПМС и ПМС-М: в исходном состоянии (до термоопрессовки) и после термоопрессовки при 160°C в течение 10–15 минут. Напряжения начала ЧР $U_{\text{НЧР}}$ одинаковы на исходных образцах — 1,0 кВ, а после термопрессования в течение 1 ч при 160°C — 1,7 кВ. Результаты сравнительных измерений характеристик ЧР представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что термоопрессовка изоляции обмоточных проводов с применением пленочных слюдосодержащих материалов — важная технологическая операция, позволяющая снизить значения характеристик частичных раз-

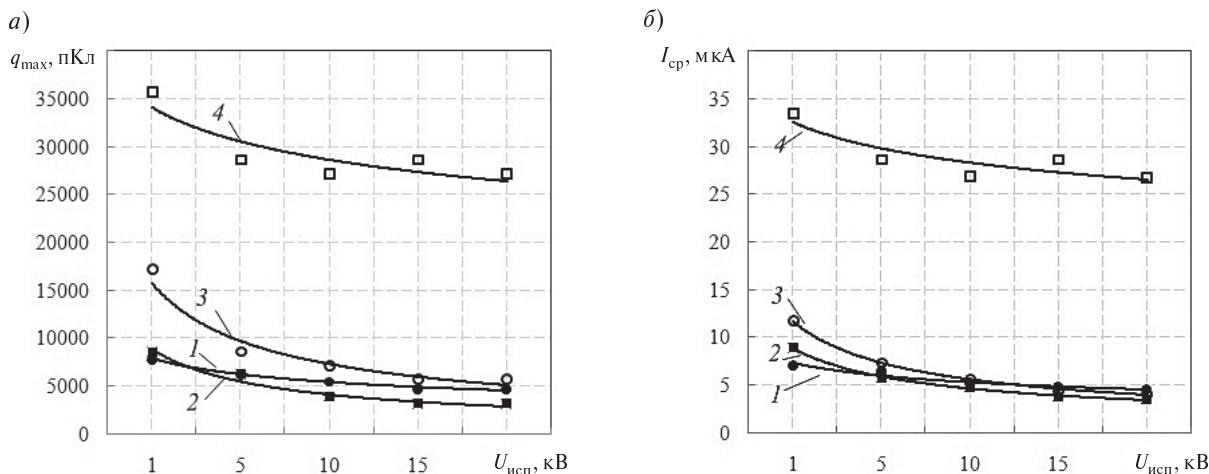


Рис. 1. Результаты измерения характеристик ЧР максимального кажущегося заряда q_{max} (а) и среднего тока $I_{\text{ср}}$ (б) — в зависимости от времени воздействия $U_{\text{исп}}$ (1,5 кВ) на изоляцию обмоточных проводов:
1 — ПМС, 2 — ПМС-М, 3 — ПМС до термоопрессовки, 4 — ПМС-М до термоопрессовки

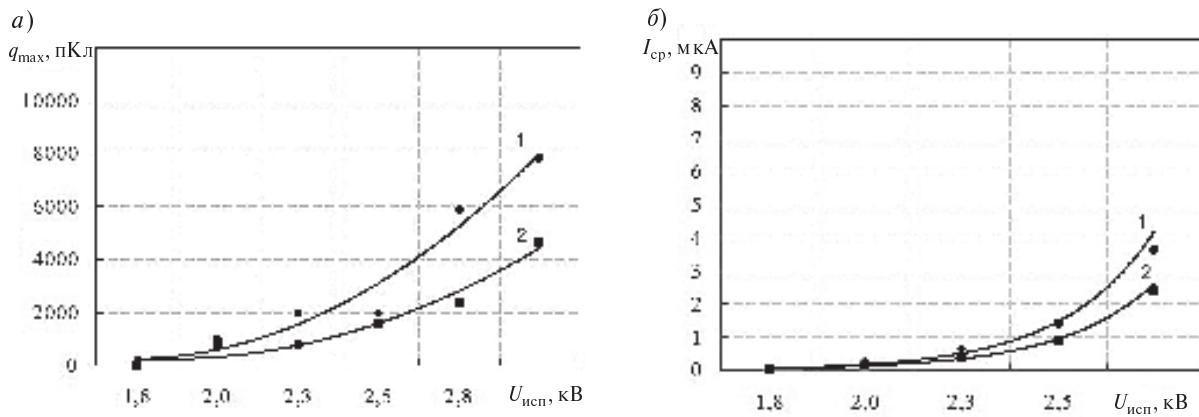


Рис. 2. Результаты измерения характеристик ЧР максимального кажущегося заряда q_{\max} и среднего тока I_{cp} — в зависимости от испытательного напряжения $U_{исп}$ обмоточных проводов:
1 — ПМС, 2 — ПМС-М

рядов. С течением времени воздействия испытательного напряжения значения частичных разрядов снижаются.

На рис. 2, а, б представлены результаты измерения максимального кажущегося заряда q_{\max} и среднего тока I_{cp} в зависимости от испытательного напряжения $U_{исп}$.

Из рис. 2 следует, что провод ПМС-М имеет лучшую изоляцию по сравнению ПМС, поскольку значения характеристик частичных зарядов меньше. Так как за счет адгезивного слоя,

который расплывается при термоопрессовке, изоляция плотнее прилегает к медной жиле, ее поверхность имеет меньше дефектов за счет заполнения связующим.

Измерение зависимости тангенса угла диэлектрических потерь ($\tg\delta$) изоляции от $U_{исп}$ и температуры T проводилось с помощью прибора «Вектор 2.0 М» по ГОСТ 25242–93. В табл. 1 представлены результаты измерения $\tg\delta$ изоляции проводов ПМС и ПМС-М при различных испытательных напряжениях и температурах в диапазоне от 20 до 160 °C с шагом 35 °C (разбросы значений составляли малые величины $(0,01–0,04)\cdot10^{-2}$).

Из табл. 1 видно, что при напряжениях, меньших напряжения начала ЧР, (при увеличении $U_{исп}$ с 0,5 до 1,0 кВ) $\tg\delta$ изоляции образцов ПМС и ПМС-М увеличивается незначительно, поскольку $\tg\delta$ определяется собственными потерями в диэлектрике (на проводимость и поляризацию). Когда $U_{исп}$ достигает примерно 1 кВ, в воздушных включениях возникают ионизационные процессы, т. е. появляются ЧР. По мере роста напряжения ЧР возникают в большем количестве полостей, и значения $\tg\delta$ начинают возрастать.

При сравнении зависимостей $\tg\delta = F(U_{исп})$ изоляции исследуемых проводов оказалось, что значения $\tg\delta$ изоляции проводов ПМС-М с адгезивным слоем ниже, чем у ПМС. Эта тенденция сохраняется во всем диапазоне рабочих температур (до 125 °C). При дальнейшем повышении температуры до 160 °C отмечен значительный рост измеренных значений $\tg\delta$ изоляции как у провода ПМС, так и ПМС-М.

Таблица 1

Результаты измерения $\tg\delta \cdot 10^{-2}$ изоляции проводов ПМС, ПМС-М при различных $U_{исп}$ и T

$U_{исп}, \text{kV}$	tgδ · 10⁻² при температуре $T, ^\circ\text{C}$				
	20	55	90	125	160
Для провода ПМС:					
0,5	3,0	4,1	5,0	6,7	9,8
1,0	3,5	6,0	5,6	8,0	13,3
1,5	5,2	7,0	7,9	10,8	15,3
2,0	6,7	9,3	9,9	12,0	17,3
2,5	9,5	10,7	11,1	14,0	17,5
3,0	11,0	11,8	12,2	15,0	18,6
Для провода ПМС-М:					
0,5	2,4	2,5	3,6	3,9	11,3
1,0	2,9	3,2	5,2	6,3	13,3
1,5	4,3	5,2	7,8	8,7	15,8
2,0	5,5	6,1	8,5	9,3	18,2
2,5	7,0	7,5	9,0	10,4	19,0
3,0	7,9	8,3	9,2	10,6	20,8



Таблица 2

Значения $\operatorname{tg}\delta$ изоляции макетов при $U_{\text{исп.}} = 0,5 \text{ кВ}$

Тип провода	Продолжительность старения, ч	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^{-2}$, при температуре T				
		20 °C	55 °C	90 °C	125 °C	160 °C
ПМС	—	2,96±0,01	4,11±0,01	4,98±0,01	6,72±0,01	9,75±0,02
ПМС	520	1,87±0,02	2,12±0,02	4,73±0,02	6,38±0,03	11,52±0,04
ПМС	780	1,90±0,02	2,36±0,02	5,31±0,03	8,65±0,04	13,48±0,04
ПМС-М	—	2,35±0,01	2,51±0,01	3,63±0,01	7,90±0,01	11,33±0,01
ПМС-М	520	1,57±0,02	1,67±0,02	3,81±0,02	7,96±0,03	11,72±0,04

В табл. 2 представлены результаты измерения $\operatorname{tg}\delta$ изоляции проводов ПМС и ПМС-М до и после теплового старения при 160 °C.

Из табл. 2 следует, что значения $\operatorname{tg}\delta$ изоляции у проводов ПМС и ПМС-М при рабочих напряжениях (от десятков до нескольких сотен В на виток) удовлетворяют общепринятым требованиям к системам изоляции статорных обмоток (так как их значения составляют до $10 \cdot 10^{-2}$) за исключением температуры изоляции 160 °C (граничной для класса нагревостойкости F).

После теплового старения в течение 520 часов значения $\operatorname{tg}\delta$ изоляции двух типов образцов несущественно увеличились по сравнению с исходными значениями или вовсе не превышали их, однако при максимальной испытательной температуре 160 °C увеличение составило около 18 % для ПМС и 3 % для ПМС-М. При увеличении времени старения изоляции у образцов ПМС наблюдался дальнейший рост $\operatorname{tg}\delta$ (например, при увеличении продолжительности в 1,5 раза, уве-

личение $\operatorname{tg}\delta$ составило около 38 %); у ПМС-М не было значительного увеличения, однако пробивные напряжения изоляции резко снизились.

На рис. 3, *a*, *b* приведены графики зависимостей $\lg(\operatorname{tg}\delta) F(1/T)$ для изоляции обмоточных проводов ПМС и ПМС-М при испытательной напряженности электрического поля 5 кВ/мм ($U_{\text{исп.}} = 1 \text{ кВ}$) до и после теплового старения в течение 520 часов.

Как можно видеть из рис. 3, *a*, *b*, для всех образцов проводов графики зависимостей $\lg(\operatorname{tg}\delta) = F(1/T)$ в исследованном диапазоне температур (20–160 °C) могут быть представлены в виде двух отрезков прямых линий, характеризующихся разным углом наклона к оси абсцисс. В разных температурных зонах на диэлектрические потери в слюдосодержащей изоляции могут влиять различные физические явления, происходящие за счет изменения температуры, а именно: в низкотемпературной зоне проявляется межслоевая поляризация; в высокотемпературной — диполь-

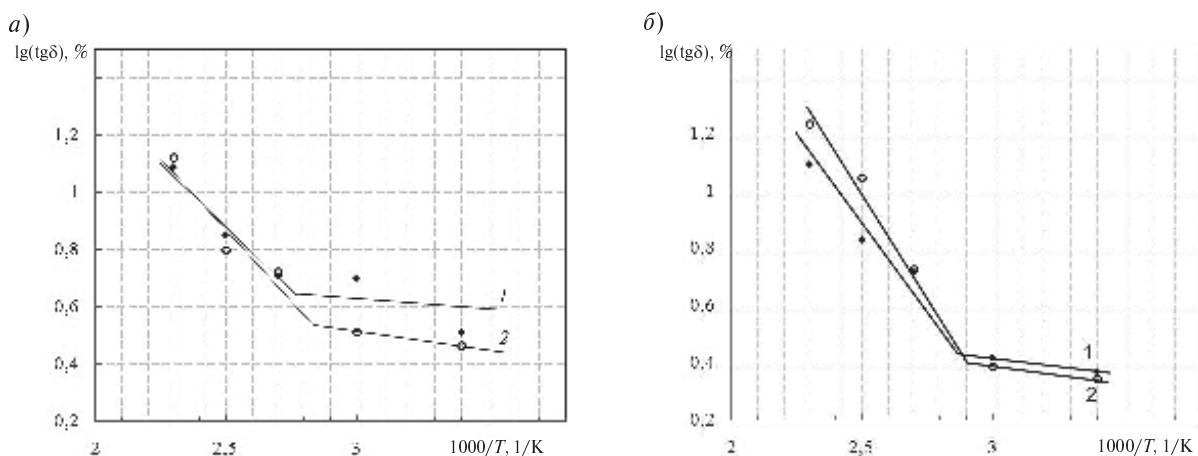


Рис. 3. Зависимости $\lg(\operatorname{tg}\delta) F(1/T)$ при испытательном напряжении 1 кВ для изоляции обмоточных проводов ПМС (1); ПМС-М (2) до старения (а) и после старения (б)

но-релаксационная поляризация, а также ионная проводимость.

Значения $\text{tg}\delta \cdot 10^{-2}$ при температуре 160 °C для провода ПМС составили $9,75 \pm 0,02$, а для ПМС-М — $11,33 \pm 0,01$. После теплового старения в течение 520 ч при 160 °C значения $\text{tg}\delta \cdot 10^{-2}$ при температуре 160 °C составили для провода ПМС — $11,52 \pm 0,04$, ПМС-М — $11,72 \pm 0,01$.

Как следует из приведенных данных (рис. 3), даже в исходном состоянии отличия между базовым вариантом проводов со слюдосодержащей изоляцией ПМС (с применением лент Элмикафол 52801) и ПМС-М (с адгезивным слоем, лента Кондуктофол 0264) проявляются как в низко-, так и в высокотемпературной зоне. Базовый вариант изоляции провода ПМС, изготовленный из Элмикафол 52801, характеризуется большими значениями $\text{tg}\delta$ в низкотемпературном диапазоне до 100 °C по сравнению с ПМС-М с адгезивным слоем на ленте Кондуктофол 0264. Однако значения $\text{tg}\delta$ становятся соизмеримыми у ПМС и ПМС-М в высокотемпературном диапазоне. Это, по-видимому, может означать, что более плотное прилегание изоляции на проводе ПМС-М за счет kleевого слоя дает возможность снизить внутрислоевую поляризацию при низких температурах, но не снижает ионную проводимость, которая резко возрастает в высокотемпературном диапазоне.

После старения образцов увеличение скорости роста значений $\text{tg}\delta$ изоляции всех образцов в низкотемпературном диапазоне говорит об ухудшении электрических свойств изоляции. У изоляции провода ПМС-М скорость роста значений $\text{tg}\delta$ значительно увеличилась в высокотемпературном диапазоне, состояние изоляции сильно ухудшилось, несмотря на невысокие значения $\text{tg}\delta$. В подтверждение этого установлено значительное снижение электрической прочности после 520 ч старения, не позволившее проводить исследование $\text{tg}\delta$ данного типа образцов после старения в течение 780 часов при тех же испытательных напряжениях. Скорость роста $\text{tg}\delta$ изоляции провода ПМС (в зависимости от температуры) после старения практически не изменилась при общем снижении $\text{tg}\delta$ изоляции.

Из проведенных исследований $\text{tg}\delta$ до теплового старения следует, что применение адгезивного слоя в изоляции ПМС-М все-таки не позволяет снижать диэлектрические потери в витковой изоляции в процессе длительной экс-

плуатации. А применение провода ПМС (с лентой Элмикафол 52801), наоборот, возможно в ответственных высоковольтных электрических машинах, у которых перегрев обмоток достигает 160 °C (по сравнению с температурами для F класса нагревостойкости системы изоляции, которые рекомендованы принятymi стандартами в зависимости от номинальных мощности и напряжения электрических машин).

Дополнительно были проведены измерения $\text{tg}\delta$ изоляции обмоточных проводов ПМС/0,44 и ПМС-М/0,44 в диапазоне частот от 50 до 100 000 Гц до и после теплового старения при 160 °C в течение 780 часов (при испытательном напряжении, равном 5 В). Получены логарифмические зависимости $\text{tg}\delta = f(f_c)$ изоляции проводов ПМС/0,44 и ПМС-М/0,44 до и после старения во всем температурном диапазоне от 20 до 160 °C. Как ожидалось, полученные данные значений $\text{tg}\delta$ с увеличением частоты уменьшаются. После старения в течение 720 ч при 160 °C диэлектрические потери изоляции провода ПМС-М практически не изменяются, а у провода ПМС уменьшаются.

Таким образом, результаты проведенного исследования показывают, что, несмотря на полученное по всем характеристикам превосходство изоляции провода ПМС-М с адгезивным слоем, после теплового старения стало понятно: их применение в ответственных машинах, обмотки которых имеют рабочую температуру более 80 °C, не рекомендуется. Для того, чтобы подтвердить полученные результаты в условиях, приближенных к эксплуатационным, необходимо провести дополнительные исследования характеристик частичных разрядов в изоляции, а также сравнительные макетные испытания образцов ПМС и ПМС-М (в катушках).

В ходе работы установлено, что новый тип обмоточных проводов с комбинированной пленочной изоляцией на основе слюдосодержащих лент имеет высокую кратковременную и длительную электрическую прочность, низкие диэлектрические потери в изоляции во всем диапазоне рабочих температур и частичных разрядов. Изоляция провода ПМС-М с применением адгезивного слоя (лента Кондуктофол 0264, Изовольта, Австрия) менее стойка к тепловому старению, по сравнению с ПМС с применением российского материала Элмикафол 52801 (ОАО ХК «Элинар»).



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парфентьев, Д.В. Основные аспекты внедрения частотно-регулируемого электропривода на насосные станции водоснабжения [Текст] / Д.В. Парфентьев, Б.А. Иванов // Электроцех.— 2008. — №12.— С. 16—24.
2. Schuler, R. Modern turn insulation for stator windings with form-wound coils, in high-voltage rotating machines [Текст] / R. Schuler. // ASEA Brown Boveri Ltd. CH-5242 Birr/Switzerland. CH2587-4/88/0000-769. IEEE. 1988.
3. Neal, J.E. The Development of Micaceous Conductor [Текст] / J.E. Neal // Turn Insulation for HV Rotating Machines Jones Stroud Insulations.— Longridge, Preston PR3 3BS, Lancashire.— UK.— Р. 53—59.
4. Joseph, A. Functional test comparison between mica over bare copper and double polyester glass over heavy polyester-amide imide insulation for high voltage multi-turn coils [Текст] / Joseph A. Williams III // IEEE.— 2003.— 0-7803-7935-7/03. P. 595—597.
5. Карпушина, Т.И. Исследование современных типов обмоточных проводов для высоковольтных электрических машин [Текст] / Т.И. Карпушина // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010.— № 1(95). С. 131—137.
6. Кучинский, Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях [Текст] / Г.С. Кучинский. — Ленинград: Энергия, 1979 .— 224 с.
7. Андреев, А.М. Оценка технического состояния электрических двигателей и генераторов на основе анализа частичных разрядов [Текст]: Учебное пособие. Ч. 1 / А.М. Андреев, А.Ш. Азизов, А.И. Таджибаев, А.Е. Монастырский // Санкт-Петербург, 2007.— 61 с.

УДК 621.311

П.Г. Пуликов

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ ФТОРОПЛАСТОВУЮ ПЛЕНКУ

Электроэнергетическое оборудование средних и высших классов напряжения — один из наиболее дорогостоящих и ответственных видов оборудования, применяемого при производстве, распределении и потреблении электроэнергии. В последние годы появился ряд новых проблем, главная из которых связана с существенным старением парка эксплуатируемого оборудования. Это приводит к определенному изменению целей и задач эксплуатации. Если раньше основными задачами были своевременное и качественное проведение регламентных работ и предотвращение аварийных отказов оборудования, то теперь основной задачей эксплуатации является продление реального ресурса оборудования сверх нормативных значений. Очевидно, что эта задача может быть решена только путем выявления дефектов, зародившихся в оборудовании, на ранних стадиях их развития и своевременного устранения этих дефектов.

К сожалению, реализуемая в настоящее время система планово-периодического контроля не по-

зволяет эффективно выявлять зарождение дефектов, особенно в оборудовании, имеющем значительный (выше нормативного) срок эксплуатации.

Эта проблема, а также ряд других эффективно решаются путем внедрения систем непрерывного контроля состояния оборудования в эксплуатации. Одним из наиболее эффективных методов выявления дефектов в таком оборудовании служит анализ растворенных в масле газов. Измерение концентрации водорода и углеводородных газов (метан, этан, этилен, ацетилен) позволяет обнаруживать дефекты, появляющиеся и развивающиеся в трансформаторах [1]. Этот метод сейчас эффективно применяется для выявления дефектов в трансформаторном оборудовании, однако основная измерительная методика — газовая хроматография — практически не реализуема в системах непрерывного контроля. Для непрерывного контроля могут использоваться датчики растворенных в масле газов.

При разработке датчиков растворенных в масле газов необходимо решить задачу выделе-

ния газов из масла в газовую полость. Для выделения газов из масла может использоваться либо диффузия газа через полупроницаемую мембрану, либо диффузия газа из тонкой пленки масла.

Наиболее просто и надежно — извлечение газа через полупроницаемую мембрану. Этот способ не требует наличия каких-либо сложных элементов или подвижных частей в датчике. Масляная полость отделяется от газовой полости, мембраной, и за счет процессов диффузии газы из масла проникают в газовую полость в соответствии с законом Генри. Измерив концентрацию газов в газовой полости, можно легким пересчетом, зная коэффициенты растворимости газов в масле, определить концентрацию этих газов в масле.

Постановка задачи. Скорость диффузии через полупроницаемые мембранны достаточно низкая, что следует учитывать при проектировании систем с их применением. Кроме того, из опубликованных источников известно [2], что существует достаточно сильная зависимость коэффициента диффузии газов через полимерные мембранны от температуры.

На первом этапе работы уже был выбран материал полимерной мембранны, а также ее толщина и площадь для обеспечения, с одной стороны, наибольшей скорости проникновения газа в газовую полость, а с другой, — высокой надежности самой конструкции. По результатам первого этапа работы [3] материалом полимерной мембранны был выбран фторопласт Ф-МБ-2, толщина мембранны — 10 мкм, а площадь — 95 см².

Для выбранного материала полимерной мембранны так и не удалось в опубликованных данных найти температурные зависимости коэффициента диффузии для каждого из диагностических газов. Кроме того, из публикаций из-

вестно, что даже незначительные химические добавки в полимер и условия применения полимера могут сильно влиять на коэффициент диффузии. Исходя из всего этого было решено приступить ко второму этапу исследований: провести экспериментальное определение коэффициента диффузии для выбранной фторопластовой мембранны по водороду в интервале рабочих температур (30–80 °C) маслонаполненного оборудования. Для этого был разработан специальный испытательный стенд.

Испытательный стенд. Испытательный стенд представляет собой герметичную камеру подготовки (КП-9) и три идентичных, также герметичных испытательных ячейки (К-260) с 10 мкм фторопластовыми мембранными с повышенной стойкостью к трансформаторному маслу. Общий вид испытательного стендса приведен на рис. 1, а.

КП-9 наполовину заполнена трансформаторным маслом, которое посредством компрессора непрерывно барботируется водородно-воздушной смесью, за счет чего поддерживается равновесие между концентрацией водорода в воздухе над маслом и в самом масле (в соответствии с законом Генри). Камеры КП-9 и три ячейки К-260 посредством шлангов объединены в последовательную, циклически замкнутую систему. В этой системе установлен шестеренчатый насос для прокачки масла по замкнутому контуру. Таким образом обеспечивается одинаковый постоянный поток масла у поверхности фторопластовых мембранных трех испытательных ячеек К-260. Для поддержания постоянной температуры циркулирующего масла в КП-9 был встроен нагревательный элемент с электронной схемой терmostатирования, обеспечивающей поддержание заданной температуры с точностью, не превышающей одного градуса Цельсия.

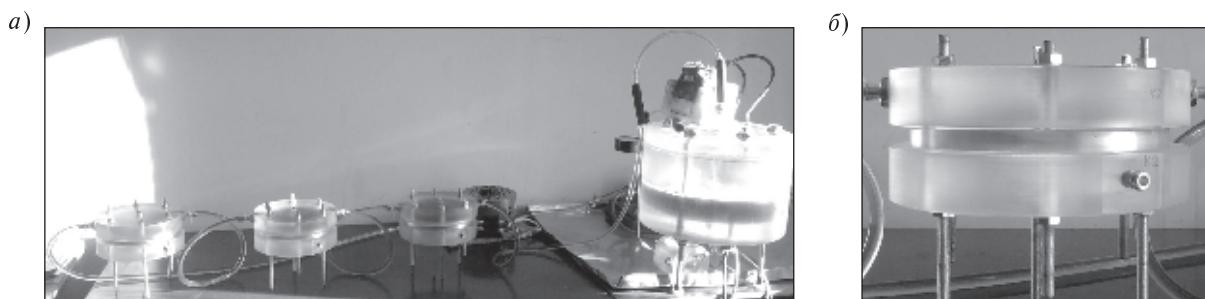


Рис. 1. Общий вид испытательного стендса (а) и ячейки К-260 (б)



Испытательные ячейки К-260 в свою очередь состоят из двух камер, разделенных фторопластовой мембраной. На рис. 1, б приведен общий вид одной из испытательных ячеек. Через первую (верхнюю) масляную камеру ячейки обеспечивается проток масла. Затем ниже размещена фторопластовая мембрана, закрепленная в алюминиевом корпусе. Она отделяет циркулирующее масло от газовой герметичной накопительной камеры — второй (нижней) камеры. В нее проникает растворенный в масле водород и там постепенно накапливается до равновесной концентрации с растворенным в масле водородом (опять же по закону Генри). Таким образом, концентрация в накопительной воздушной полости каждой из камер К-260 стремится к тому же значению концентрации водорода в воздухе над маслом, что и в КП-9. Объем накопительной камеры (260 мл) позволяет устанавливать в ней газовые датчики, но в данном случае для уменьшения времени эксперимента ее объем был уменьшен до 80 мл путем заполнения ее полиэтиленовыми шариками. Для измерения концентрации водорода в накопительной камере она была снабжена устройством отбора проб газа на хроматограф.

Порядок проведения эксперимента. Эксперимент проводился следующим образом. В камеру подготовки КП-9 вводилось определенное количество водорода, включалась барботация на на-

грев. Режим барботации и нагрева масла выбирался таким образом, чтобы спустя полчаса достиглось равновесное газосодержание водорода в КП-9, а масло прогревалось бы до заданной температуры. Только после этого включалась циркуляция масла через измерительные ячейки К-260. Затем с определенной периодичностью измерялась концентрация газа в КП-9 и трех К-260 с помощью хроматографа.

Обработка результатов. Полученные в результате проведенного эксперимента данные сведены в табл. 1.

По полученным экспериментальным данным для каждого значения температуры рассчитаем коэффициент диффузии водорода D через фторопластовую мембрану. Для этого воспользуемся первым законом Фика, который устанавливает соотношение между потоком вещества и градиентом концентрации [2]:

$$J(t) = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (1)$$

где J — количество вещества, прошедшего в единицу времени через единицу площади сечения, нормального к x . Знак минус в уравнении показывает, что диффузия происходит в направлении убывания концентрации c . Используя уравнение (1), рассчитаем коэффициент диффузии водорода D через фторопластовую мембрану по следующей формуле:

Таблица 1

Результаты измерений диффузии водорода через фторопластовую мембрану

$T_{\text{исп. в.}}^{\circ}\text{C}$	$t, \text{ час}$	Концентрация водорода, ppm			
		K1-I-9	K1-260	K2-260	K3-260
30	0	4701	119	112	120
	5,5	4671	431	422	435
	22,5	4551	1195	1139	1200
50	0	4550	7,3	11,7	15,1
	6	4367	573	522	576
	23	4239	1796	1666	1786
60	0	3993	20	27	14
	19	3786	1604	1653	1643
	45	3516	2677	2673	2673
	67	3464	2966	2980	2929
70	0	4032	15	14	11
	6	4054	931	929	890

$$D = \frac{J(t)}{\Delta c(t)} = \frac{\frac{dc_{K260}(t)}{dt} \Big|_{t=0}}{\frac{V_\mu S_{mb}}{d_{mb}}} V_{K260}, \quad (2)$$

где c_{K260} — концентрация водорода в накопительной камере ячейки К-260 [ppm]; $c_{\text{КП}}$ — концентрация водорода в камере подготовки КП-9 [ppm];

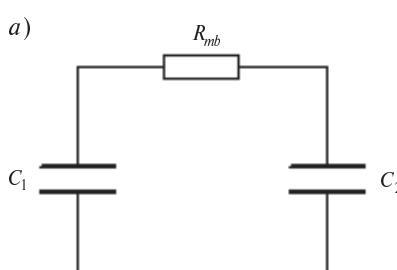
$V_{K260} 80 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ — объем накопительной камеры ячейки К-260; $S_{mb} 0,0095 \text{ м}^2$ — площадь фторопластовой мембранны; $d_{mb} 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ — толщина фторопластовой мембранны; $V_\mu 22,4 \text{ м}^3/\text{моль}$ — молярный объем газа при начальных условиях.

Чтобы в формуле (2) вычислить скорость нарастания (производную) концентрации в начальный момент времени, представим нашу экспериментальную установку в виде эквивалентной электрической схемы (рис. 2, а), в которой объемы всех камер обозначим емкостями C_1 и C_2 , а фторопластовую мембранны изобразим в виде сопротивления R_{mb} .

Емкость C_1 представляет собой сумму газового объема камеры подготовки КП-9 и эквивалентного воздушного объема масла в соответствии с коэффициентом растворимости водорода в масле. Тогда C_1 рассчитаем последующей формуле:

$$C_1 = V_{\text{КП}} + k_{H2} V_{\text{масла}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{КП}} 5800 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ — объем камеры КП-9, $V_{\text{масла}} 3700 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ — объем масла в системе, $k_{H2} 0,05$ — коэффициент растворимости водорода в масле.



Исходя из того, что три ячейки К-260 идентичны, их объемы можно суммировать. Тогда:

$$C_2 = 3V_{K260}, \quad (4)$$

где $V_{K260} 80 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ — объем накопительной камеры ячейки К-260.

Опираясь на курс ТОЭ, по эквивалентной схеме замещения нетрудно понять как будут изменяться концентрации водорода (напряжения) во времени в эквивалентных емкостях C_1 и C_2 (рис. 2, б). Но так как начальная концентрация водорода в C_1 для каждого последующего значения температуры масла всегда была различной, то выражения для C_1 и C_2 приведем к c_m — установившемуся значению концентрации в C_1 и C_2 . Тогда

$$c_{1,2}(t) = \left(\frac{c_{1,2}(0)}{c_m} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau}} + 1, \quad (5)$$

где $c_{1,2}(0)$ — начальное значение концентрации соответственно в C_1 и C_2 .

Используя формулу (5), вычислим производную

$$\frac{dc_{K260}(t)}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{dc_2(t)}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{c_m - c_2(0)}{\tau}, \quad (6)$$

где c_m легко вычисляется по формуле

$$c_m = c_1(0) \frac{C_1}{C_1 + C_2}. \quad (7)$$

Подставим (6) и (7) в формулу (2) и, учитывая, что $c_1 c_{\text{КП}} \ll c_2 c_{K260}$, получим окончательное выражение для вычисления коэффициента диффузии:

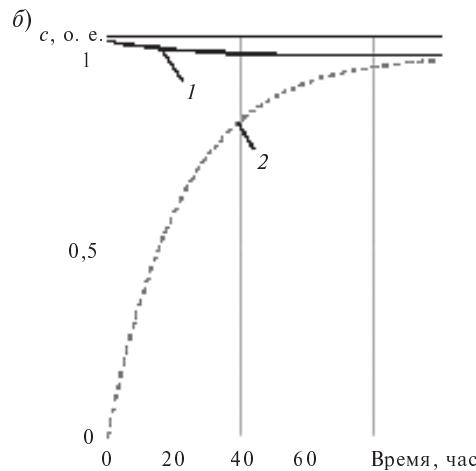


Рис. 2. Электрическая схема замещения (а) и кривые изменения концентрации водорода (б): 1 — $c_1(t)$ в объеме C_1 ; 2 — $c_2(t)$ в объеме C_2

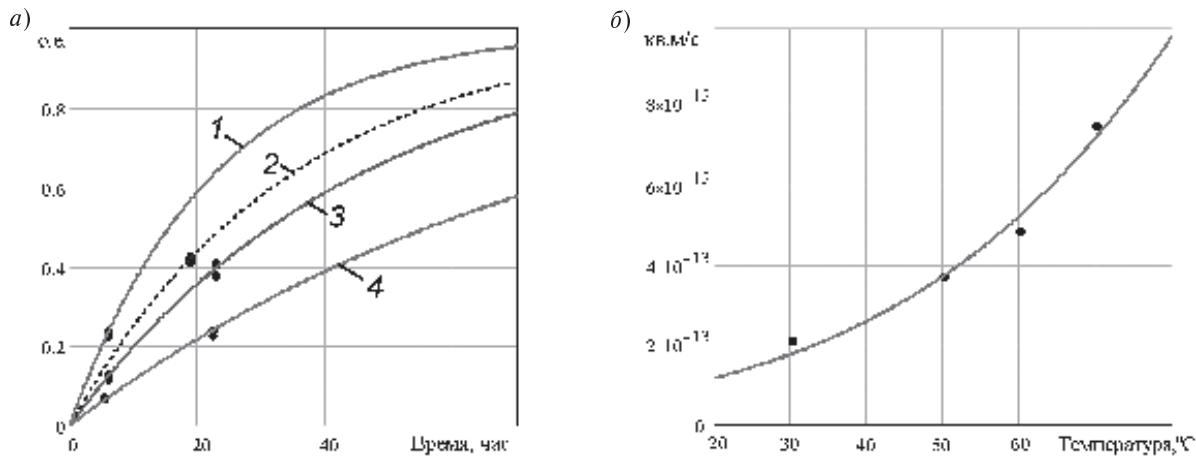


Рис.3. Зависимость концентрации водорода в К-260 от времени (а) при температуре масла: 70 (1), 60 (2), 50 (3) и 30 (4) °С и зависимость коэффициента диффузии от температуры масла (б)

$$D = \frac{\left(c_{\text{КП}}(0) \frac{C_1}{C_1 + C_2} - c_{\text{K260}}(0) \right) V_{\text{K260}} d_{mb}}{(c_{\text{КП}}(0) - c_{\text{K260}}(0)) S_{mb} \tau}. \quad (8)$$

В соответствии с формулой (5) для экспериментальных данных были получены по методу наименьших квадратов (математический пакет «Mathcad») кривые. Эти кривые и исходные экспериментальные данные приведены на рис. 3, а.

Далее были рассчитаны коэффициенты диффузии по формуле (8) с использованием постоянных времени τ , полученных в «Mathcad». Постоянные времени τ и рассчитанные коэффициенты диффузии D в зависимости от температуры масла приведены в табл. 2.

Из публикаций известно, что в соответствии с активационной моделью диффузии, где перескок молекулы происходит только в том случае, если она обладает энергией, равной или большей энергии активации E (энергетического барьера), зависимость коэффициента диффузии от температуры может быть выражена уравнением

$$D = D_0 e^{-E/RT}, \quad (9)$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель; R — универсальная газовая постоянная; E — энергия активации.

Уравнение (9) широко используется для описания температурной зависимости скорости диффузии низкомолекулярных веществ в полимерах [6–8]. Мы тоже используем уравнение (9) для описания температурной зависимости коэф-

фициента диффузии водорода через фторопластовую мембранны, строя соответствующие кривые по экспериментально полученным данным с использованием метода наименьших квадратов. На рис. 3, б приведена расчетная кривая зависимости коэффициента диффузии от температуры масла. Согласно формуле (9) предэкспоненциальный множитель — $D_0 = 3,02 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{s}$, а энергия активации $E = 30,3 \text{ кДж}$.

Выводы. Было проведено измерение коэффициента диффузии водорода через фторопластовую мембранны при температурах циркулирующего масла, характерных для рабочего диапазона температур трансформаторного оборудования (30–80 °С).

Экспериментальные данные хорошо согласуются с предполагаемой температурной зависимостью активационной модели. Были рассчитаны коэффициенты уравнения для этой модели и выяснено, что коэффициент диффузии водорода через фторопластовую мембранны меняется в разы в рабочем температурном диапазоне трансформаторного оборудования.

Таблица 2

Результаты расчета коэффициентов диффузии

$T_{\text{раб.}}, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{час}$	$D, 10^{-13} \text{ м}^2/\text{s}$
30	81,1	2,08
50	45,2	3,73
60	34,6	4,87
70	22,5	7,48



Работа представляет большой практический интерес для построения систем непрерывного контроля состояния трансформаторов, в которых используется мембранные выделение диагностических газов, растворенных в трансформаторном масле.

На сегодняшний день фторопластовые мембранны такого же типа в составе мониторинговых комплексов «СКИТ» проходят апробацию в реальных эксплуатационных условиях: датчики с полупроницаемой мембраной установлены на Сургутской ГРЭС 2, на Нижнекамской ГЭС

в Набережных Челнах и на подстанции «Кудрово» в Санкт-Петербурге.

Несомненно, что детальное исследование диффузионных характеристик полупроницаемых мембран повысит надежность получаемой информации и позволит своевременно обнаруживать появляющиеся и развивающиеся дефекты в ответственном маслонаполненном, что даст возможность перейти от устаревшей методики обслуживания по срокам эксплуатации к обслуживанию по реальному состоянию и надежно предотвращать аварийные отказы такого оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 153-34.0-46.302-00 Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов [Текст] / АО ВНИЭ; Департамент науч.-техн. политики и развития РАО «ЕЭС России».— М., 2000.
2. Рейтлингер, С.А. Проницаемость полимерных материалов [Текст] / С.А. Рейтлингер.— М.: Химия, 1974.
3. Монастырский, А.Е. Контроль концентрации газов в масле силовых трансформаторов [Текст] / А.Е. Монастырский, П.Г. Пуликов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2009. № 2(78).
4. Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей [Текст] / Я.И. Френкель.— М.: Изд-во АН СССР, 1945. С. 189.
5. Терлецкий Н.П. Статистическая физика [Текст] / Н.П. Терлецкий.— М.: Высшая школа, 1966.— 229 с.
6. Рыскин Г.Я. Энергия активации и температурная зависимость диффузии в полимерах [Текст] / Г.Я. Рыскин // Журнал технической физики.— 1955. Т. 25. Вып. 3.— С. 458–465.
7. Роджерс, К. Проблемы физики и химии твердого состояния органических соединений [Текст] / К. Роджерс.— М.: «Мир», 1968.
8. Ed. J. Crank, H. Park, L. Diffusion in Polymers [Текст] / Ed. J. Crank, H. Park.— N.-Y.: Acad. Press, 1968.— 368 р.



МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.048.7

М.И. Абашин, А.А. Барзов,
А.Л. Галиновский, В.А. Шутеев

УЛЬТРАСТРУЙНАЯ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

При ударно-динамическом взаимодействии сверхскоростной ($V_c > 500$ м/с) ультраструи жидкости (воды) с твердотельной мишенью происходит ее интенсивная поверхностная гидроэрозия. Это энергетически многоплановое явление лежит в основе группы традиционных операционных ультраструктурных технологий: гидрорезания различных материалов и гидроочистки поверхностей изделий от трудноудаляемых загрязнений. Однако, как показали выполненные исследования, явление ультраструктурной гидроэрозии при плотности мощности гидроструи примерно 1 МВт/мм² можно использовать для технологически значимой активации и эффективного обеззараживания различных жидкостей, в первую очередь воды [1], получения ультрамелкодисперсных функциональных супензий с набором уникальных биологических и других потребительских свойств [2], а также ультраструктурной микродиагностики материалов и изделий.

Помимо самостоятельного значения процесса ультраструктурной гидроэрозии, по его результатам, таким как ее интенсивность, форма и микротопография образующейся гидрокаверны, по масс-геометрическим характеристикам продуктов эрозионного разрушения материала, а также косвенным признакам, например высокоенергетическим сигналам акустической, экзоэлектронной и электромагнитной эмиссии, можно судить о физико-механических параметрах, характеризующих состояние поверхностного слоя объекта диагностирования. Основные из этих параметров: пластичность, прочность, твердость, уровень остаточных напряжений, структурно-

фазовый состав и другие характеристики. Как известно, эти параметры ответственны за эксплуатационно-технологические свойства всего изделия, в частности за его остаточный ресурс, износостойкость, текущую поврежденность, в том числе в результате энергетически экстремальных, нерасчетных воздействий (пожар, радиация) и т. п.

Именно данное обстоятельство служит физико-технологической основой для разработки и практического применения нового способа ультраструктурной экспресс-диагностики (УСД) и контроля параметров состояния поверхностного слоя деталей и изделий в различных отраслях экономики: машиностроении, топливно-энергетическом комплексе, атомной энергетике, строительной индустрии и т. д.

Таким образом, под УСД будем понимать операционную ультраструктурную технологию (УСТ), состоящую в воздействии на определенные участки поверхности конструкции или детали ультраструктурой жидкости (воды) или гидросуспензии с целью получения необходимой контрольно-диагностической информации об основных показателях качества изделия.

Процедура и особенности ультраструктурной диагностики

Технологическая процедура ультраструктурного диагностирования состоит в реализации следующих основных этапов:

1. На исследуемый объект оказывается краткосрочное ультраструктурное контрольно-диагностическое воздействие, вызывающее гидроэро-

зию его поверхностного слоя. Воздействие осуществляется при определенных режимах: заданном рабочем давлении жидкостей или абразивно-жидкостной струи, например водоледяной супензии; ее диаметре; требуемом угле падения, рациональной кинематике движения по диагностируемой поверхности (индентирование или скрайбирование) и т. д.

2. Затем определяются параметры ультраструйной гидроэрозии — характеристики гидрокаверны (макро- и микротопография ее поверхности и прилегающей области, геометрические параметры, а также эрозионный унос массы у некрупногабаритных деталей или образцов; масс-геометрические параметры частиц, эродированных с поверхности объекта диагностирования (их количество, размеры, законы распределения и т. д.).

3. Весьма желательно включить в программу оценки результатов диагностирования комплексный металлографический анализ и средства

электронно-растровой микроскопии. Полученные результаты сравниваются с эталонными характеристиками и/или между собой на различных участках диагностируемой поверхности объекта исследования, и на основании этого судят о параметрах качества контролируемого участка поверхности, например об остаточном ресурсе конструкционного материала, его эксплуатационно-технологической поврежденности, а также делают заключение о текущем и прогнозном состоянии объекта в целом. При этом весьма результативно использование соответствующего программно-математического обеспечения фотомикроскопических исследований, что резко повышает эффективность обработки визуально наблюдаемой картины гидроэрозии и ее продуктов, включая компьютерную оцифровку цветных изображений эродированных микрочастиц.

В качестве иллюстрации возможностей УСД на рис.1 представлены результаты индентирования поверхности образцов, подвергнутых (обра-

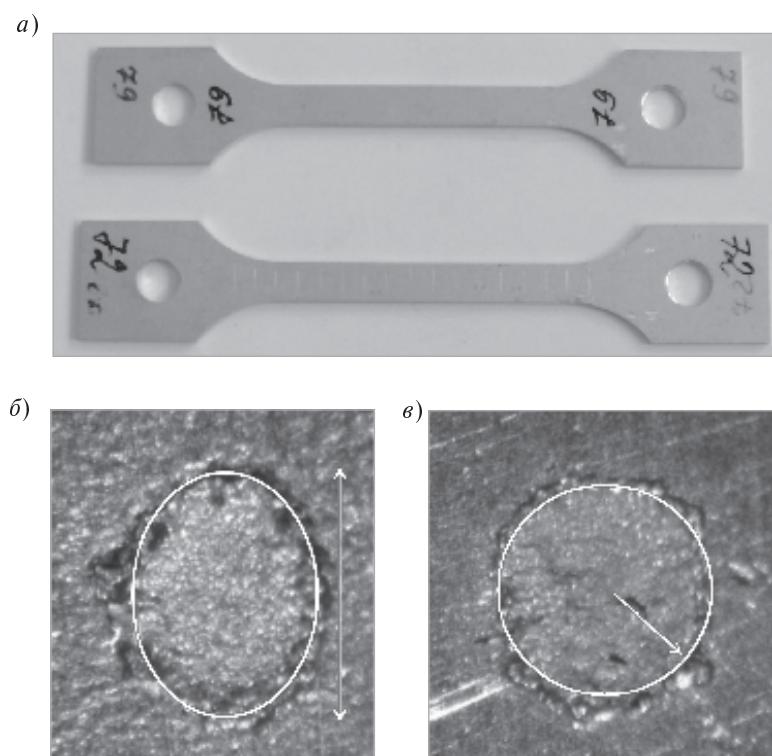


Рис. 1. Ультраструктурная диагностика индентированием поверхности:

a — образцы для УСД (верхний — исходный образец, нижний — подвергнутый одноосному растяжению); *b* — овальная гидрокаверна на образце, подвергнутом одноосному растяжению; *c* — круглая гидрокаверна на исходном образце



зец № 72, рис. 1, а) и не подвергнутых (образец № 79, рис. 1, а) одноосному растяжению. Анализируя полученные для данных образцов (соответственно рис. 1, б и рис. 1, в) результаты, в частности формы гидрокаверн, можно вполне достоверно определить характер деформационного старения материала.

Условно все особенности УСД как технического средства получения необходимой информации об изучаемом объекте разделим на две основные группы, связанные с физико-технологической и информационно-диагностической спецификой данного способа исследования свойств поверхностного слоя твердых тел.

Физико-технологическая специфика УСД сводится к следующим основным положениям:

1. Энергетически экстремальная неравновесность ударно-динамических процессов в зоне взаимодействия ультраструктуры жидкости с поверхностью твердого тела (мишени) обуславливает доминирующий характер усталостно-волнового механизма ее ультраструктурной гидроэрозии. При этом нужно учитывать, что при высокой плотности мощности ультраструктуры ($\approx 1 \text{ МВт}/\text{мм}^2$) возникающее сверхинтенсивное акустическое излучение (до 10 МГц) и сопутствующие явления электромагнитной природы существенным образом способны изменить исходные физико-механические параметры поверхностного слоя материала мишени.

2. В соответствии с вышеизложенным при осуществлении процедуры УСД для большинства объектов контроля соблюдается принцип подобия между диагностическими и эксплуатационными воздействиями, так как применительно к значительному числу реально наблюдаемых вариантов термо-силового нагружения конструкционных материалов можно отметить, что подавляющее большинство изделий машиностроения эксплуатируется в условиях нестационарных механических воздействий при относительно невысоких температурах. Поэтому сверхинтенсивное динамическое и умеренное термическое (не больше 70°) воздействия на конструкционный материал в процессе УСД критерциально наиболее близки к реальным условиям эксплуатации целого ряда типовых промышленных объектов в топливно-энергетическом комплексе, атомной энергетике, на транспорте и т. п. Это подчеркивает физико-технологическую значимость УСД как перспективного средства

получения оперативной и достоверной информации о параметрах состояния объекта диагностирования, межотраслевую результативность ее применения и возможность эффективного использования на основных этапах жизненного цикла изделий.

3. УСД органически сочетается с выполнением других операционных УСТ, в частности с гидрорезкой материалов. Данное обстоятельство существенным образом положительно влияет на инновационно-технологический потенциал УСД, расширяет функциональные возможности УСТ в целом.

Информационно-диагностические особенности УСД заключаются в следующем:

УСД оперирует с весьма значительным и представительным массивом физически взаимосвязанных информативных признаков и критериев, что в вероятностном смысле весьма положительно влияет на результативность и достоверность ультраструктурного экспресс-контроля параметров качества поверхностного слоя деталей или изделий и, как следствие, на эффективность диагностики в целом;

информационные параметры УСД можно разделить на прямые и косвенные. К прямым, или квазистатическим, признакам относятся массово-геометрические характеристики эродированных частиц твердотельной мишени, микро- и макро-геометрия гидрокаверны и прилегающей к ней зоны пластического отеснения материала, параметры его физико-механического состояния и т. д. Все эти признаки условно можно назвать контрольно-диагностической остаточной информацией, так как они являются материализованным результатом ультраструктурного гидроэррозионного воздействия на твердое тело и относительно стабильны во времени после возникновения.

Информативные параметры ультраструктурной диагностики

Косвенные, или динамические, информативные признаки обусловлены неравновесной спецификой энергетически экстремального взаимодействия ультраструктуры жидкости (воды) с твердотельной мишенью. К ним относятся, помимо традиционных термо-силовых параметров данного взаимодействия, совокупность волн упругой деформации — сверхинтенсивное широкополосное акустическое возмущение зоны диагностирования: акустическое излучение (АИ)

или акустическая эмиссия (АЭ), широкополосное, вплоть до рентгеновского [3], электромагнитное излучение (ЭМИ) и экзоэмиссия весьма энергоемких электронов (ЭЭЭ). Данные динамические информационные параметры УСД существенно расширяют ее контрольно-диагностические и исследовательские возможности. Кроме того, их можно весьма эффективно использовать при построении соответствующих диагностических методик оперативного, в режиме реального времени, контроля за ходом выполнения других операционных процессов УСТ. Так, в случае гидроабразивного резания различных материалов параметры АЭ эффективны при оценке состояния элементов технологического оборудования, например текущем контроле из-

носа струеформирующих элементов — гидросопла и абразивно-жидкостного насадка.

Не подлежит сомнению, что между прямыми и косвенными информативными параметрами УСД существует энергетически обусловленная взаимосвязь, которая в свою очередь является следствием физико-технологической специфики данного микро- и наноразрушающего метода получения научно-исследовательской (фундаментальной) и прикладной (технологической) информации о свойствах твердого тела и динамически взаимодействующей с ним жидкости (воды). В этом положении заключается принцип информационно-технологического дуализма процессов ультраструктурной гидроэрозии, в общем виде схематично представленный на рис. 2.

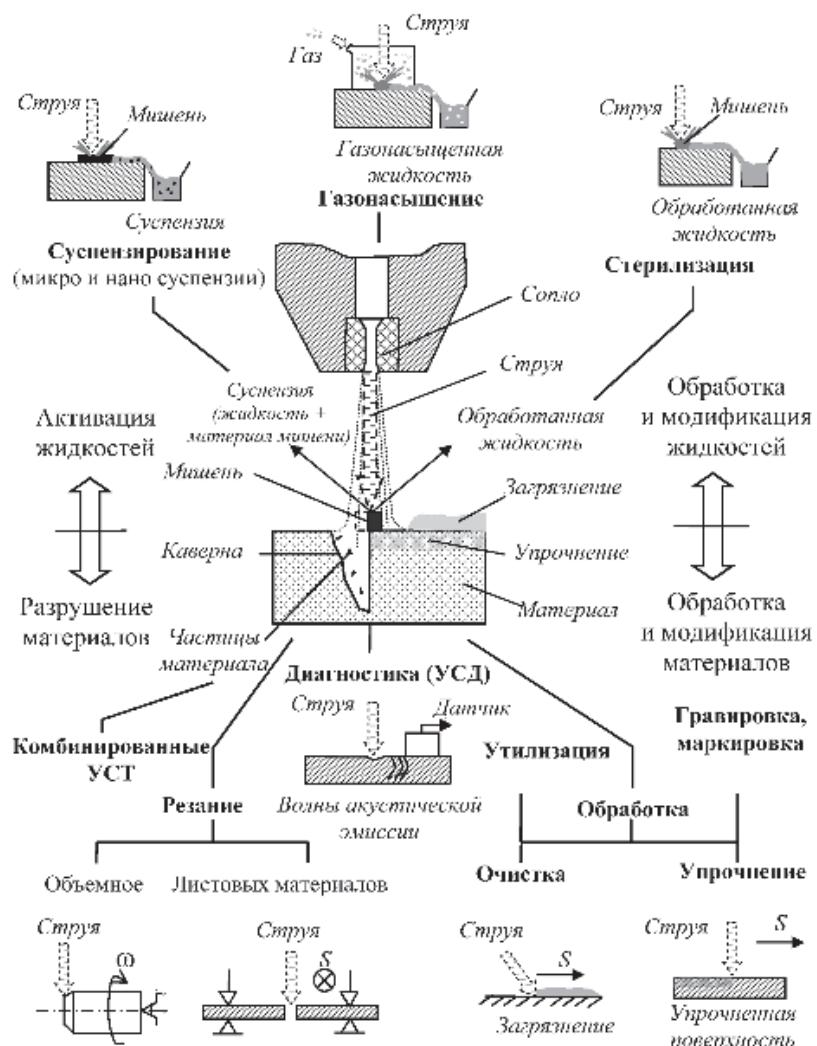


Рис. 2. Иллюстрация принципа информационно-технологического дуализма процессов ультраструктурной гидроэрозии



Важнейший элемент данной схемы, иллюстрирующий широкие функциональные возможности УСТ в целом, — способность к изменению свойств самой жидкости (воды), которая в виде ультраструи подвергается энергетически экстремальному ударно-динамическому воздействию со стороны твердотельной мишени. Причем в месте удара ультраструи сам материал мишени находится в условиях воздействия сверхвысокого уровня подводной энергии и ее волновых превращений. Образующиеся при этом взаимодействии совокупность взаимно-обусловленных прямых и обратных связей между физическими, энергетическими, химическими и др. параметрами жидкости и твердого тела сопровождается изменениями их свойств в результате интенсивного диспергирования (разрушения), т. е. гидроэрозии (твердое тело) и спреобразования (жидкость). В связи с этим изменение свойств жидкости в процессе ультраструйного ударно-динамического взаимодействия с твердотельной мишенью можно считать специфическим диагностическим признаком данного метода исследования свойств не только различных материалов и мелкодисперсных суспензий на их основе, но и применяемых при этом жидкостей, в первую очередь — воды и ее производных. Причем сам процесс струйно-ударного спреобразования жидкостей несет важную информацию об исследуемой гидротехнологической среде.

Таким образом, помимо самостоятельного значения [4], ультраструйная обработка жидкостей (воды) имеет весьма характерную информационно-диагностическую составляющую, требующую подробного изучения и анализа в будущем.

Энерго-физические процессы при ультраструйном диагностировании

Как было отмечено, вхождение в число информативных признаков УСД взаимосвязанной совокупности эмиссионно-волновых процессов, в частности высокочастотного электродинамического потенциала диагностируемой поверхности, обусловленного явлениями АЭ и ЭЭЭ, позволяет обеспечить повышение оперативности процедуры контроля и диагностирования различных материалов и изделий в целом.

Мощное АИ или АЭ при УСД имеет две составляющие: активную (А) и информативную (И). Первая способна существенным образом

влиять на изменение поврежденности объекта исследования или контроль путем реализации механизма малоциклового роста исходных дефектов (микротрещины), инициировать их образование и т. п. (рис. 3). При этом возникает информативная составляющая АЭ, обусловленная кинетикой изменения (увеличение, рост) поврежденности. Кроме того, исходная информативная составляющая АИ или АЭ — их аппаратурно-регистрируемая часть — позволяет оперативно судить о динамическом, ударно-волновом характере взаимодействия ультраструи жидкости с поверхностным слоем исследуемого твердого тела. Причем практически значимые соотношения между А и И частями слагаемых общей энергии АИ (АЭ) условно можно представить в виде

$$\begin{aligned} \text{АИ}_{\text{общ}} &= k_A \text{АИ}_A + k_I \text{АИ}_I \rightarrow \\ &\rightarrow \Delta\omega_A + \bar{k}_I \bar{\text{АЭ}}_I, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\text{АИ}_{\text{общ}}$ — общая величина энергии волн упругих деформаций (АИ или АЭ); k_A и k_I — коэффициенты пропорциональности, причем $k_A \approx 1$, $k_I, \bar{k}_I \ll 1$; $\Delta\omega_A$ — контрольно-диагностическое изменение поврежденности поверхности твердого тела (мишени) в месте образования каверны, связанное с возникновением новых поверхностей (субмикро- и микротрещины, скопления дислокаций и т. п.).

Очевидно, что $\bar{k}_I \ll k_I$ (согласно физической сущности рассматриваемой задачи). Поэтому регистрация $\bar{\text{АЭ}}_I$ на фоне АИ_I практически нереализуема. Однако путем анализа АИ_I возможна вполне достоверная и оперативная оценка $\Delta\omega_A$, что весьма важно в данном методе диагностирования и контроля качества параметров состояния поверхностного слоя детали или изделия.

Помимо рассмотренного варианта трансформации (1), возможны и другие физико-энергетические схемы. Например, вполне реально существование механизма трансформации АИ в ЭМИ (прямой акустоэлектрический эффект), АЭ, $\Delta\omega$ в ЭЭЭ (механоэмиссия быстрых электронов) и т. п. Однако общей чертой этих процессов и явлений будет энергетическая пропорциональность между латентными (скрытыми) и регистрируемыми контрольно-диагностическими признаками, ответственными за текущее и прогнозное состояние поверхностного слоя конкретного объекта исследования.

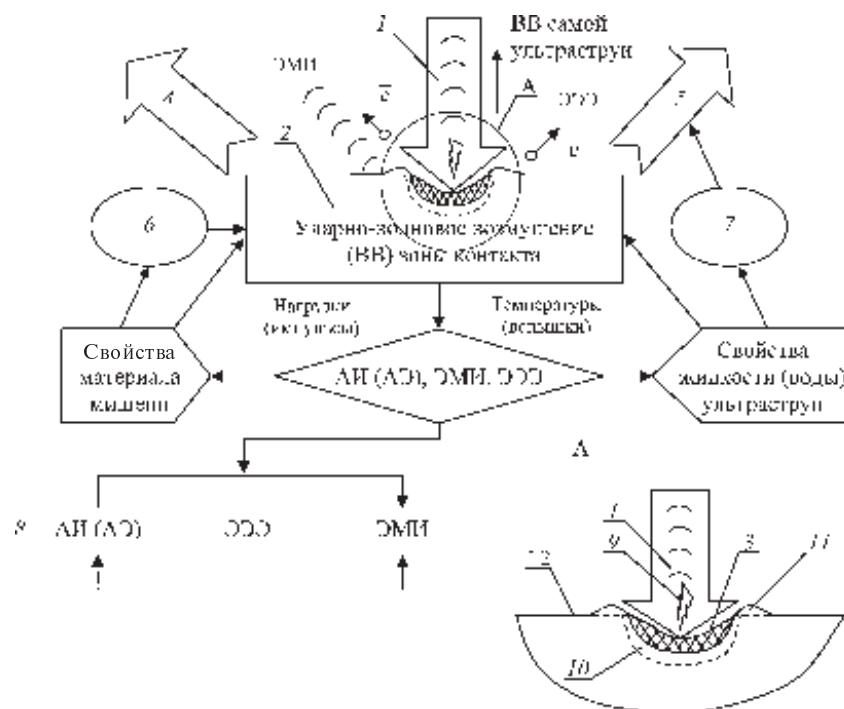


Рис. 3. Формирование взаимообусловленной системы прямых и обратных энерго-физических связей в зоне ультраструктурного диагностирования:

1 — ультраструктура жидкости (воды); 2 — твердотельная мишень или заготовка; 3 — промежуточный, “границный” слой вещества твердого тела на условной границе раздела фаз; 4 — совокупность информационных признаков эродированных частиц материала мишени; 5 — информативные параметры жидкости (воды) в спроеобразном состоянии; 6 — механо-физические изменения свойств твердого тела в условиях ударно-волнового возмущения; 7 — физико-химических механизм изменения свойств жидкости (воды) при ударно-динамическом, в частности ультразвуковом, электронном, электромагнитном и других видах воздействия; 8 — иллюстрация взаимосвязи эмиссионно-волновых признаков ультраструктурной гидроэррозии; 9 — зона ультраструктурной кавитации; 10 — зона гидроэрозионного предразрушения; 11 — валик пластического оттеснения материала мишени из зоны ультраструктурной гидроэррозии; 12 — диагностируемая поверхность твердотельной мишени

Выполненные исследования по анализу инновационно-технологического потенциала УСД позволяют сформулировать основные научно-инженерные принципы контроля и диагностирования, а также сделать следующие выводы:

1. При ультраструктурном диагностировании достаточно полно реализуется принцип подобия между эксплуатационно-технологическим и контрольно-диагностическим взаимодействиями, что обеспечивает высокую информативность исследований параметров состояния поверхностного слоя материалов и изделий.

2. Ультраструктурное диагностирование характеризуется информационно-технологическим дуализмом процессов гидроэррозии, которая слу-

жит также физической основой ряда обрабатывающих ультраструктурных технологий: резки и очистки материалов и конструкций. В связи с этим УСД информационно-эффективно дополняет данные операционные гидротехнологии.

3. В информационном отношении ультраструктурное воздействие на материал существенно превосходит другие виды технологических контрольно-диагностических воздействий (лазерный луч, фрикционные испытания и т. д.).

4. УСД характеризуется целым рядом физически взаимосвязанных косвенных и прямых информативно-диагностических параметров, признаков и критериев, анализ которых позволяет осуществлять достоверную экспресс-оцен-



ку основных эксплуатационно-технологических характеристик и параметров состояния материала поверхностного слоя объекта исследования и контроля.

5. Ультраструктурная диагностика обладает значительным потенциалом инженерно-физического развития и практического приложения в различных областях производства и промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барзов, А.А. Струйная интенсификация функциональной активности жидкостей [Текст] / А.А. Барзов, А.Ф. Королев, В.С. Пузаков, К.Е. Сидельников, Н.Н. Сысоев / Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.— Физическая гидродинамика. 2004.— Препринт № 7.

2. Балашов, О.Е. Физико-технологический анализ функциональных возможностей ультраструктурного микросупензирования жидкостей [Текст] / О.Е. Балашов, А.А. Барзов, А.Л. Галиновский, Н.Н. Сысоев / Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.— 2010.— Препринт № 4.— 28 с.

3. Корнилова, А.А. Ударно-кавитационный механизм генерации рентгеновского излучения при кавитации быстрой струи воды [Текст] / А.А. Корнилова, В.И. Высоцкий, Н.Н. Сысоев [и др.] // Вестник МГУ. 2010.— М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова.— С. 14–25.

4. Барзов, А.А. Физико-технологические возможности ультраструктурной обработки материалов и жидкостей [Текст] / А.А. Барзов, В.С. Пузаков, С.К. Сальников, Н.Н. Сысоев / Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.— Физическая гидродинамика.— 2004.— Препринт. № 6.— 25 с.

УДК 629.1.032.001

P.B. Русинов, Р.Ю. Добрецов, И.М. Герасимов

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОГО ЦИКЛА «АДИАБАТНОГО» ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Принципиальной особенностью поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является цикличность их рабочего процесса, позволяющая нормализовать функционирование системы охлаждения ДВС и гарантировать возможность работы самих двигателей при высоких параметрах (давление — температура) рабочего тела и, следовательно, с высоким КПД, в частности у дизелей — до 40–50 %.

Естественное стремление к дальнейшему повышению эффективности работы ДВС привело к мысли о создании «адиабатного» двигателя с теплоизолированными камерами сгорания, ограничивающими теплопотери на охлаждение, которые вообще-то составляют до 30–35 % от теплоты, вводимой в камеру сгорания с топливом. Однако стендовые испытания подобных двигателей к положительному результатам не привели.

Тем не менее, учитывая особую сложность натурных испытаний и не во всех случаях возможность объективной оценки получаемых при испытаниях результатов, представляется акту-

альным проведение расчетно-теоретического анализа основных параметров «адиабатных» двигателей для окончательного решения кардинального вопроса их перспективности.

С этой целью прежде всего надлежало сформировать математическую модель некоего подобия рабочего, или действительного, теплового цикла (индикаторная диаграмма), позволяющего в дальнейшем оценивать возможные показатели работы двигателей при ограничении потерь на охлаждение.

В основу подобного формирования были положены в качестве исходных данные для нефорсированного (без наддува) четырехтактного транспортного дизеля ЯМЗ-238 (8Ч13/14) с неразделенными камерами сгорания, чья эффективная мощность — $N_e = 176,5 \text{ кВт}$ (240 л.с.) при числе оборотов коленчатого вала $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$, степень сжатия — $\varepsilon = 16,5$, удельный эффективный расход топлива — $g_e = 238 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$, эффективный КПД — $\eta_e = 0,36$, среднее эффективное давление рабочего (теплового) цикла —

$p_e = 0,68$ МПа, механический КПД — $\eta_m = 0,85$ и избыток воздуха при сгорании топлива — $\alpha = 1,5$. Для расчетного цикла при неизменном во всех случаях значении максимального давления сгорания топлива $p_z = 8,5$ МПа, обеспечивающего механическую надежность дизеля, приняты показатели политроп процессов сжатия и расширения горючей смеси, соответственно равные $n_1 = 1,37$ и $n_2 = 1,22$; давление начала процесса сжатия рабочей смеси — $p_a = 0,083$ МПа ($0,85$ кгс/см²), начальная температура — $T_a = 290$ К, теплоемкость горючей смеси при постоянном объеме — $c_v = 0,17$ ккал/кг·град и при постоянном давлении — $c_p = 0,23$ ккал/кг·град.

Расчетный тепловой цикл «адиабатного» двигателя показан на рис. 1.

Для сгорания 1 кг дизельного топлива с низшей теплотворной способностью $Q_t^h = 10000$ ккал/кг (42000 кДж/кг) теоретически требуется примерно 14,3 кг воздуха, а при полуторном его избытке в данном случае общая

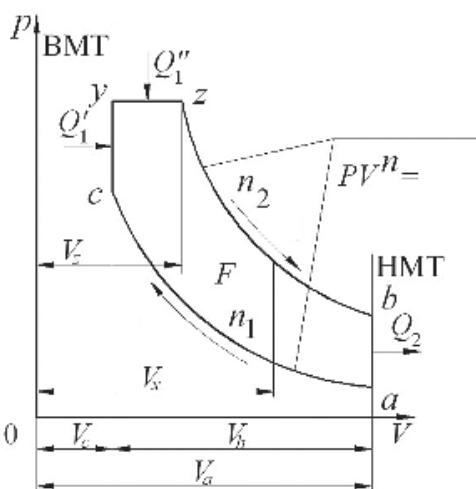


Рис. 1. Тепловой цикл «адиабатного» двигателя: p — давление в цилиндре; V — объем цилиндра; V_a — полный объем цилиндра; $V - V_c$ — объем камеры сгорания; V_h — рабочий объем цилиндра; V_z — объем на конец предварительного расширения; V_x — текущий объем; $Q'_1 + Q''_1 = Q_1$ — теплота, подводимая к рабочему телу; Q_2 — отводимая теплота; n_1 и n_2 — показатели политроп сжатия и расширения; ВМТ — верхняя мертвая точка положения поршня; НМТ — нижняя мертвая точка

масса горючей смеси составит $1,5 \cdot 14,3 + 1 = 22,45$ кг, а теплота на единицу массы смеси — $Q = 10000 / 22,45 = 445,4$ ккал/кг.

Очевидно, что для производства именно механической энергии (индикаторная мощность N_i) реально используется лишь доля от общей теплоты, вводимой в камеру сгорания дизеля с топливом, остальная же часть рассеивается в основном в виде тепловых потерь.

Следовательно, для формирования расчетного цикла в первом приближении можно принять долю в 51 % ($\eta_e = 36\%$, $\eta_m = 85\%$, т. е. при механических потерях в 15 %) от общего количества подводимой в цикле теплоты.

При этом следует учесть также и теплопотери в политропических процессах сжатия и расширения, и некоторую идеализацию формируемого теплового процесса с исключением непрерывности функционального изменения его параметров в узловых точках (см. рис. 1), на что всегда вводится поправка при анализе индикаторных диаграмм. Суммарно оценим их в 8 %.

Таким образом, общие теплозатраты на воспроизведение только механической энергии единичного цикла в расчете на единицу массы рабочей смеси составят

$$Q_1 = Q'_1 + Q''_1 = (0,51 - 0,08)Q = 0,43 \cdot 445,4 = 192 \text{ ккал/кг.}$$

По известным расчетным выражениям [1] давление и температура формируемого цикла соответственно равны

$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1} = 0,083 \cdot 16,5^{1,37} = 3,86 \text{ МПа};$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} = 290 \cdot 16,5^{1,37-1} = 818,2 \text{ К.}$$

Степень повышения давления равна $\lambda = p_z / p_c = 8,5 / 3,86 = 2,2$, откуда $T_y = \lambda T_c = 2,2 \cdot 818,2 = 1800 \text{ К}$; $Q'_1 = c_v (T_y - T_c) = 0,17 (1800 - 818,2) = 167 \text{ ккал/кг}$; $Q''_1 = Q_1 - Q'_1 = 192 - 167 = 25 \text{ ккал/кг}$; $T_z = Q''_1 / c_p + T_y = 25 / 0,23 + 1800 = 1908,7 \text{ К}$; степень предварительного расширения — $\rho = T_z / T_y = 1908,7 / 1800 = 1,06$; степень последующего расширения — $\delta = \varepsilon / \rho = 16,5 / 1,06 = 15,57$; давление и температура конца процесса расширения соответственно $p_b = p_z / \delta^{n_2} = 8,5 / 15,57^{1,22} \text{ МПа}$ и $T_b = T_z / \delta^{n_2-1} = 1908,7 / 15,57^{1,22} = 1043,4 \text{ К}$.



Для определения среднего индикаторного давления p_i рассматриваемого «расчетного» цикла следует определить площадь F «индикаторной» диаграммы (см. рис. 1), представляющую в определенном масштабе работу цикла, и поделить ее на рабочий объем V_h цилиндра (или на ход S поршня при расчете площади «индикаторной» диаграммы в координатах « $P-S$ »), т. е. $p_i = F/V_h = F/(V_a - V_c)$.

Сама площадь индикаторной диаграммы с очевидностью представляется площадью $F_1 + F_2$ под линиями « $y-z$ » и « $z-b$ » (участки 1 и 2 на рис. 1) за вычетом площади F_3 под кривой « $c-a$ » (участок 3). Так,

$$F_1 = p_z(V_z - V_c) = p_z \frac{V_c}{V_a} (V_z - V_c) = \lambda p_c V_c (\rho - 1).$$

Для участка 2 по уравнению политропы

$p_z V_z^{n_2} = p_x V_x^{n_2}$ и $p_x = p_z (V_z/V_x)^{n_2} = \lambda p_c V_z^{n_2} V_x^{-n_2}$, и соответственно получаем дифференциал $dF_2 = \lambda p_c V_z^{n_2} V_x^{-n_2} dV_x$, откуда

$$\begin{aligned} F_2 &= \lambda p_c V_z^{n_2} \int_{V_z}^{V_a} V_x^{-n_2} dV_x = \\ &= \lambda p_c V_z^{n_2} \frac{V_x^{-n_2+1}}{-n_2+1} \Big|_{V_z}^{V_a} = \frac{\lambda p_c V_z}{-n_2+1} \left(\frac{V_z^{n_2-1}}{V_a^{n_2-1}} - \frac{V_z^{n_2-1}}{V_z^{n_2-1}} \right) = \\ &= \frac{\lambda p_c V_z}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right). \end{aligned}$$

По аналогии с предыдущим

$$F_3 = \frac{p_c V_c}{n_1-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right).$$

Получим

$$\begin{aligned} p_i &= \frac{p_c}{V_a - V_c} \frac{V_c}{V_a} \left[\lambda V_c (\rho - 1) + \frac{\lambda V_z}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{V_c}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right] \end{aligned}$$

и, окончательно,

$$\begin{aligned} p_i &= \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \times \\ &\times \left[\lambda (\rho - 1) + \frac{\lambda \rho}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right]. \end{aligned}$$

Среднее индикаторное давление рабочего цикла при принятых выше условиях

$$\begin{aligned} p_i &= \frac{3,86}{16,5-1} \times \\ &\times \left[2,2 \cdot (1,06-1) + \frac{2,2 \cdot 1,06}{1,22-1} \left(1 - \frac{1}{15,57^{1,22-1}} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{1,37-1} \left(1 - \frac{1}{16,5^{1,37-1}} \right) \right] = \\ &= \frac{3,86}{15,5} [0,132 + 4,81 - 1,745] = 0,796 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Среднее эффективное давление $p_e = \eta_M p_i = 0,85 \cdot 0,796 = 0,677 \text{ МПа}$.

Известно, что теплосодержание $Q = cT$, где c — теплоемкость рабочего тела, а T — его температура. В первом приближении индикаторный КПД рассматриваемого теплового цикла составит $\eta_i^0 \approx (Q_1 - Q_2)/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1$.

Полагая температуру рабочего тела, вводимого в цикл, равной максимальной температуре в конце процесса сгорания топлива $T_1 = T_z = 1908,7 \text{ К}$, а теряющую температуру $T_2 = T_b = 1043,4 \text{ К}$, для индикаторного КПД цикла с некоторым завышением его истинного численного значения (теплопотери в политропических процессах сжатия и расширения рабочего тела учтены ранее), имеем

$$\eta_i^0 \approx (1908,7 - 1043,4)/1908,7 = 0,453.$$

Однако в данном случае энергия Q_1 «расходуется» только с момента начала истинного расширения рабочей смеси (точка « z » на рис. 1), т. е. только на участке объема цилиндра (хода поршня), характеризуемого величиной δ , и потому КПД η_i^0 должен быть приведен к полному ходу, оцениваемому степенью сжатия ε , и, следовательно, представленный выше КПД надлежит уменьшить в отношении $\delta/\varepsilon = 1/\rho$, что в определенной степени компенсирует ранее допущенную неточность.

Итак, индикаторный КПД составит $\eta_i = \eta_i^0 / \rho = 0,453 / 1,06 = 0,427$.

Эффективный КПД определяется как $\eta_e = \eta_m \eta_i = 0,85 \cdot 0,427 = 0,363$, а удельный эффективный расход топлива — $g_e = \frac{3600}{Q_t^h \eta_e} = \frac{3600}{4200 \cdot 0,363} = 236 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$

Как видно, все основные показатели «расчетного» цикла — p_e , η_e , g_e — фактически тождественны соответствующим показателям дизеля ЯМЗ-238 ($p_e = 0,68 \text{ МПа}$, $\eta_e = 0,36$, $g_e = 238 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$)

Основные расчетные данные, соответствующие номинальному режиму работы дизеля ЯМЗ-238, представлены в табл. 1 (поз. 1).

В качестве вариантов степени термоизоляции камер сгорания, когда происходит уменьшение теплоотвода в охлаждающую жидкость и рост теплоты Q_l , примем градации 20, 40, 60 и 80 ккал/кг.

Основные данные для этих случаев сообразно представленной ранее расчетной методике приведены в поз. 2–5 табл. 1.

По мере роста Q_l обращает на себя внимание рост максимальной температуры процесса сгорания топлива T_z (примерно 90 К на каждые 20 ккал/кг увеличения Q_l) и одновременно рост температуры T_b , т. е. рост тепловых потерь с выпускными газами.

Далее, очевидно, что рост Q_l связан только с увеличением теплоты Q_l'' или с ростом степени

предварительно расширения ρ , результатом чего является повышение среднего индикаторного и эффективного давления цикла, а также падение КПД последнего.

Соотношение двух последних величин в функции ρ графически изображено на рис. 2, который с очевидностью показывает, что увеличение энергоспособности «адиабатного» двигателя при принятых условиях неизменности показателей n_1 и n_2 и максимального давления сгорания топлива сопровождается только падением КПД цикла и ростом удельного расхода топлива g_e .

При увеличении количества используемой в цикле теплоты и естественном изменении при этом показателей политроп сжатия и расширения (видимо, только в сторону их увеличения — роста теплонапряженности камеры сгорания, снижения интенсивности процесса догорания топлива) показатели цикла должны существенно измениться.

Сравнительные данные основных показателей теплового цикла при изменении показателей политроп ($n_1 = 1,39$, $n_2 = 1,22$) и их комбинаций с исходными показателями (применительно к поз. 3 табл. 1) даны в табл. 2.

По данным табл. 2 очевидно, что предыдущий вывод о функциональной зависимости мощности (среднего эффективного давления) и КПД (удельный расход топлива) от степени предварительного расширения ρ справедлив только для вариантов с неизменными показателями по-

Таблица 1

Параметры теплового цикла с использованием теплоты, теряющейся на охлаждение камеры сгорания

№ п/п	Q_l , ккал/кг	Q_l'' , ккал/кг	T_z , К	p_b МПа	T_b К	ρ	δ	p_i МПа	p_e МПа	η_e	g_e г/кВт·ч
1	192	25	1908,7	0,30	1043,4	1,060	15,57	0,756	0,677	0,363	236
2	212	45	1995,7	0,32	1101,9	1,109	14,88	0,850	0,733	0,341	251
3	232	65	2082,6	0,33	1161,7	1,160	14,22	0,931	0,790	0,324	265
4	252	85	2169,6	0,35	1220,2	1,206	13,68	0,993	0,844	0,310	276
5	272	105	2266,5	0,37	1285,6	1,254	13,16	1,077	0,916	0,294	291

Исходные данные: $p_z = 8,5 \text{ МПа}$; $p_a = 0,083 \text{ МПа}$; $p_c = 3,86 \text{ МПа}$; $T_a = 290 \text{ К}$; $T_c = 818,2 \text{ К}$; $T_y = 1800 \text{ К}$; $Q_l' = 167 \text{ ккал/кг}$; $\epsilon = 16,5$; $\lambda = 2,2$; $\eta_m = 0,85$; $n_1 = 1,37$; $n_2 = 1,22$; $c_v = 0,17 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$; $c_p = 0,23 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$

литроп процессов сжатия и расширения; комбинация же последних влечет и комбинацию эксплуатационных показателей двигателей.

Так, при увеличении n_2 (поз. 2 табл. 2) и, следовательно, при более «крутое» политропе расширения уменьшается площадь индикаторной диаграммы и среднее эффективное давление цикла, а КПД цикла растет, поскольку температура выпускных газов T_b при этом уменьшается.

При относительном росте показателя n_1 (поз. 3) довольно существенно повышается p_e , но снижается КПД из-за роста степени предварительного расширения ρ , а одновременный рост показателей n_1 и n_2 (поз. 4) по сравнению с исходным вариантом (поз. 1) снижает и КПД и энергоспособность теплового цикла.

Анализируя полученные результаты, естественно, следует отметить их некоторую условность, однако они, несомненно, характеризуют общие тенденции изменения рабочих параметров и количественных соотношений основных эксплуатационных показателей «адиабатных» двигателей в зависимости от количества вводимой в цикл теплоты.

В принципе, термоизоляция камер сгорания «адиабатных» двигателей в пределах рассмотренных значений Q_1 могла бы повысить среднее эффективное давление рабочего цикла и, следовательно, мощность ДВС примерно, на 30–35 %, но при снижении эффективного КПД и увеличении расхода топлива на 20–23 % (см. табл. 1).

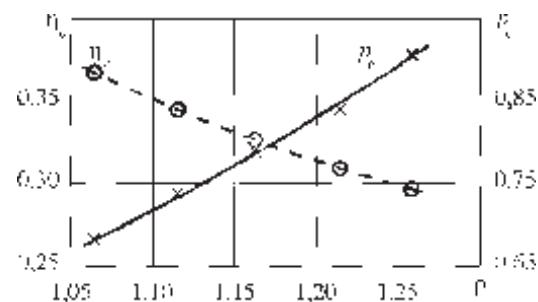


Рис. 2. Эффективные показатели «адиабатного» двигателя в функции степени предварительного расширения ρ :
 p_e — среднее эффективное давление теплового цикла; n_e — эффективный КПД цикла

В то же время следует особо отметить, что изменение показателей политроп, равно как и повышение максимального давления сгорания топлива, приводят только к взаимопротивоположным изменениям мощности и экономичности.

Не говоря о специфических трудностях обеспечения хотя бы частичной теплоизоляции камер сгорания, по полученным экспериментальным и расчетным данным в настоящее время очевидна принципиальная нецелесообразность создания «адиабатных» двигателей, поскольку уже известен путь одновременного получения положительного комплексного эффекта как в части мощности, так и в экономичности — газотурбинный наддув «обычных» двигателей [2].

Таблица 2

Параметры теплового цикла в зависимости от показателей политропических процессов сжатия n_1 и расширения n_2

№ п/п	n_1	n_2	p_c , МПа	T_c , К	λ	T_y , К	Q'_1 , ккал/кг	Q''_1 , ккал/кг	T_z , К	T_b , К	ρ	δ	p_e , МПа	η_e	g_e , г/ккал·ч
1	1,37	1,22	3,86	818,2	2,20	1800	167,0	65,0	2082,6	1161,7	1,16	14,22	0,790	0,324	265
2	1,37	1,24	3,86	818,2	2,20	1800	167,0	65,0	2082,6	1101,3	1,16	14,22	0,766	0,345	248
3	1,39	1,22	4,09	865,4	2,08	1800	158,9	73,1	2117,8	1185,4	1,18	13,98	0,803	0,317	270
4	1,39	1,24	4,09	865,4	2,08	1800	158,9	73,1	2117,8	1124,5	1,18	13,98	0,777	0,338	254

Исходные данные: $p_z = 8,5$ МПа; $\varepsilon = 16,5$; $p_a = 0,083$ МПа; $a = 290$ К; $Q_1 = 232$ ккал/кг; $\eta_m = 0,85$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русинов, Р.В. Двигатели автомобилей и тракторов [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009.— С. 120.
2. Русинов, Р.В. Сравнительный анализ эффективности работы дизелей с газотурбинным и механическим наддувом [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. - Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование.— 2010. № 4.

УДК 629.113

Н.В. Семенов, В.Е. Ролле

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ ПОПЕРЕЧНО-УГОЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ КУЗОВА

Расчет параметров подвески автомобиля проводят исходя из обеспечения требуемых норм плавности хода для вертикальных колебаний кузова. Однако нормы плавности хода предусматривают также ограничение поперечных и продольных ускорений. Существенное влияние на снижение колебаний подпрессоренной массы в поперечной плоскости оказывает наличие стабилизатора, выбор параметров которого осуществляют исходя из ограничения величины поперечно-угловых перемещений. Увеличение жесткости стабилизатора приводит к увеличению угловой жесткости всей подвески, а как следствие, к росту поперечных ускорений кузова и снижению плавности

хода. Таким образом, при расчете параметров подвески автомобиля необходимо учитывать поперечно-угловые колебания подпрессоренной массы.

Для определения угловых колебаний кузова в поперечной плоскости была разработана математическая модель [2] системы подпрессоривания автомобиля, расчетная схема которой представлена на рис. 1. Данная модель учитывает как силовое воздействие на кузов автомобиля (боковая сила), так и кинематическое воздействие на колеса (неровности дороги). Ввиду принятого при создании модели допущения, что распределение подпрессоренной массы автомобиля сим-

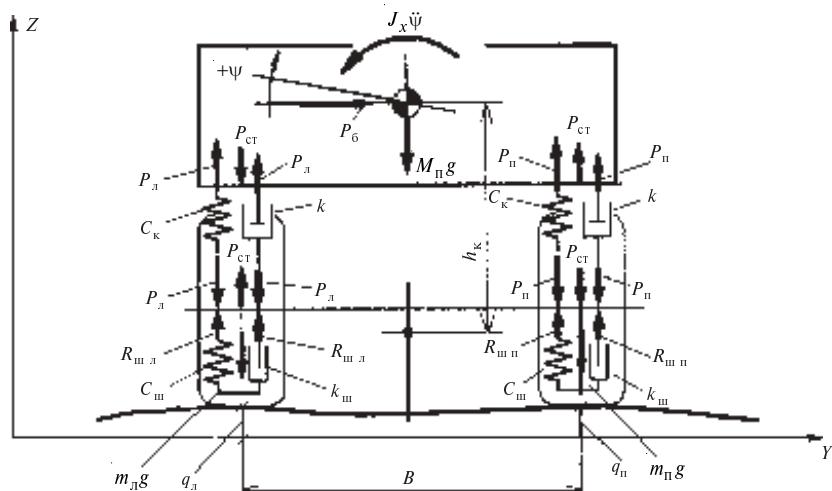


Рис. 1. Расчетная схема системы подпрессоривания автомобиля для определения поперечно-угловых колебаний кузова (на рис удалены индексы ξ , f , z)



метрично относительно продольной оси, колебания в поперечной плоскости независимы от колебаний в продольной плоскости.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: о.к. — ось крена кузова автомобиля в поперечной плоскости; ψ — поперечно-угловые перемещения кузова; $q_{\text{л(п)}}$ — высота неровностей дороги под левым (правым) колесом.

Передаточная функция системы подпрессоривания при воздействии на кузов автомобиля боковой силы $P_6(p)$ имеет следующий вид:

$$W_r(p) = \frac{\psi(p)}{P_6(p)} = \frac{h_k}{A},$$

$$A = J_x \left[(p^2 + a_1 p + a_2) - \right. \\ \left. - 2b \sum_{i=1}^n \left[(k_i p + C_{ki}) \frac{(g_{li} p + g_{2i})}{(p^2 + d_{li} p + d_{2i})} \right] \right],$$

где $r = \frac{h_k M_{\text{п}}}{J_x}$; $a_1 = \frac{B^2}{2 J_x} \sum_{i=1}^n k_i$;

$$a_2 = \frac{B^2 \sum_{i=1}^n C_{ki} + 4 \sum_{i=1}^n C_{cti} - 2 M_{\text{п}} g h_k}{2 J_x}; \quad b = \frac{B}{2 J_x};$$

$$d_{li} = \frac{k_i + k_{\text{ш}}}{m_i}; \quad d_{2i} = \frac{C_{ki} + C_{\text{ш}}}{m_i}; \quad g_{li} = \frac{B k_i}{2 m_i};$$

$$g_{2i} = \frac{B^2 C_{ki} + 4 C_{cti}}{2 B m_i}; \quad h_k — \text{плечо крена}; \quad M_{\text{п}} —$$

подпрессоренная масса автомобиля; J_x — момент инерции подпрессоренной массы относительно оси крена; C_{ki} — жесткость упругого элемента, приведенная к колесу; C_{cti} — угловая жесткость стабилизатора; g — ускорение свободного падения; m_i — неподпрессоренная масса; k_i — коэффициент демпфирования амортизатора, приведенный к колесу; $k_{\text{ш}}$ — коэффициент демпфирования шин; B — колея автомобиля; i — номер оси; p — оператор дифференцирования.

Если на кузов автомобиля действует боковая гармоническая сила, то амплитуда поперечно-угловых перемещений кузова равна

$$\psi_r(\omega) = P_6 |W_r(j\omega)|,$$

где P_6 — амплитуда боковой гармонической силы; $W_r(j\omega) = W_r(p)|_{p=j\omega}$ — амплитудно-фазовая частотная характеристика поперечно-угловых перемещений кузова при силовом воздействии; ω — частота воздействия; $j = \sqrt{-1}$.

Передаточная функция системы подпрессоривания при воздействии дорожных неровностей $\Delta q(p)$ имеет следующий вид:

$$W_q(p) = \frac{\psi(p)}{\Delta q(p)} = \\ = \frac{b \sum_{i=1}^n \left[(k_i p + C_{ki}) \frac{(n_{li} p + n_{2i})}{(p^2 + d_{li} p + d_{2i})} \right]}{\left(p^2 + a_1 p + a_2 \right) - 2b \sum_{i=1}^n \left[(k_i p + C_{ki}) \frac{(g_{li} p + g_{2i})}{(p^2 + d_{li} p + d_{2i})} \right]},$$

где $n_{li} = \frac{k_{\text{ш}}}{m_i}$, $n_{2i} = \frac{C_{\text{ш}}}{m_i}$.

Таким образом, при движении автомобиля по дороге с гармоническим микропрофилем амплитуда поперечно-угловых ускорений кузова равна

$$\ddot{\psi}_q(\omega) = \Delta q \omega^2 |W_q(j\omega)|,$$

где Δq — разность высот неровностей между левым и правым колесом; $W_q(j\omega) = W_q(p)|_{p=j\omega}$ — амплитудно-частотная характеристика поперечно-угловых перемещений кузова при кинематическом воздействии.

На основании этой модели была уточнена методика расчета параметров подвески автомобиля с учетом поперечно-угловых колебаний кузова рассмотрена на примере легкового автомобиля среднего класса массой 2400 кг. Цель расчета — определение угловой жесткости передней подвески и стабилизатора (параметры для задней подвески рассчитываются аналогично).

Исходные данные, необходимые для расчета:



Параметр	Значение параметра	Тогда необходимая угловая жесткость передней подвески со стабилизатором равна
Колея передних колес B_a , мм	1560	$C_{yt} = \frac{0,4 \cdot 1032 \cdot 9,81 \cdot 0,7}{0,08726} +$
Высота центра тяжести hg , м	0,7	$+ 1032 \cdot 9,81 \cdot 0,7 = 39573 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$.
Тип подвески передней подвески	на двойных поперечных рычагах	
Неподпрессоренная масса передней оси m_1 , кг	168	
Подпрессоренная масса приходящаяся на переднюю ось M_{pa} , кг	1032	
Момент инерции кузова J_x , кг м ²	633	
Номинальная угловая жесткость передней подвески без стабилизатора C_{ya} (Н м)/рад	24630	
Коэффициент демпфирования передних амортизаторов k_a (Н с)/м	2269	
Жесткость шин C_w , Н/м	336688	
Коэффициент демпфирования шин передней оси k_{w1} , (Н с)/м	1064	

Угловая жесткость стабилизатора передней оси. Определяем необходимую угловую жесткость передней подвески со стабилизатором исходя из условия, что при воздействии удельной боковой силы, равной $\mu = 0,4$, угол крена не будет превышать $5 \pm 0,25$ град ($0,08726$ рад) [1, 3]:

$$C_{yt} = \frac{0,4 h_k M_{pa} g}{[\psi]} + M_{pa} g h_k,$$

где h_k — плечо крена.

Для подвески на двойных поперечных рычагах (при полной загрузке) плечо крена совпадает с высотой центра тяжести. Таким образом, принимаем $h_k = h_g = 0,7$ м.

Тогда необходимая угловая жесткость передней подвески со стабилизатором равна

$$C_{yt} = \frac{0,4 \cdot 1032 \cdot 9,81 \cdot 0,7}{0,08726} + \\ + 1032 \cdot 9,81 \cdot 0,7 = 39573 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}.$$

При этом исходная угловая жесткость стабилизатора определяется разностью между необходимой угловой жесткостью подвески со стабилизатором и угловой жесткостью подвески без стабилизатора, определенной при ее проектировочном расчете:

$$C_{ct} = C_{yt} - C_{ya} = 39573 - 24630 = 14943 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}.$$

Далее определяются поперечно-угловые перемещения и ускорения кузова для различных значений угловой жесткости стабилизатора C_{ct} при силовом воздействии на кузов и кинематическом воздействии на колеса [2]. В качестве боковой силы принята центробежная сила, действующая на кузов автомобиля при маневрировании по траектории с радиусом 17,7 м со скоростью 30 км/ч. При данных параметрах боковое ускорение кузова составит $3,9 \text{ м/с}^2$, т. е. удельная боковая сила будет равна $\mu = 0,4$. Кинематическое воздействие задается разностью высот неровностей дороги между левой и правой стороной автомобиля. Для определения параметров поперечно-угловых колебаний была выбрана булыжная дорога II типа с высотой неровностей 0,022 м [3].

В табл. 1 представлены результаты расчета в зависимости от относительной жесткости стабилизатора C_{ct}/C_{ct0} . За номинальную жесткость

Таблица 1

Параметры поперечно угловых колебаний кузова в зависимости от относительной жесткости стабилизатора

Параметр	Значение параметра				
	при относительной жесткости стабилизатора C_{ct}/C_{ct0}	0	0,5	1	1,5
При маневре ($V = 30 \text{ км/ч}, R = 17,7 \text{ м}$)					
Угол крена ψ , град	10,08	5,37	3,66	2,78	2,24
При изгибе приложенных перегородок ($y_1 = 0,022 \text{ м}, l_1 = 10 \text{ м}$)					
Угловые ускорения $\ddot{\psi}$, $1/\text{с}^2$	0,91	1,35	1,81	2,29	2,82

стабилизатора C_{ct0} принято ранее полученное значение $C_{ct0} = C_{cta} = 14943 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$.

По данным табл. 1 построена зависимость поперечно-угловых перемещений и ускорений кузова (рис. 2). Здесь же отмечены допустимые уровни угла крена $[\psi]$ и угловых ускорений $[\ddot{\psi}]$.

Допустимый уровень поперечно-угловых ускорений $[\ddot{\psi}]$ определяется предельными линейными ускорениями на месте сидения водителя относительно оси крена:

$$[\ddot{\psi}] = \frac{[y]}{h_{cb}},$$

где $[y]$ — допустимый уровень линейных ускорений в поперечной плоскости; h_{cb} — расстояние от оси крена до сидения водителя.

Допустимый уровень линейных ускорений в поперечной плоскости взят по ОСТ 37.001.275—84. Для булыжной дороги II типа ускорения на месте водителя не должны превышать $0,8 \text{ м}/\text{с}^2$. Расстояние h_{cb} выбирается исходя из компоновки сидения водителя в автомобиле. В примере принято $h_{cb} = 0,6 \text{ м}$.

Отсюда допустимый уровень поперечно-угловых ускорений

$$[\ddot{\psi}] = \frac{0,8}{0,6} = 1,33 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Из полученных результатов видно, что при номинальной жесткости стабилизатора C_{ct0} угол крена не превышает допустимого уровня (точка a рис. 2). Однако ускорения кузова выше допустимого уровня (точка b рис. 2). Для снижения угловых ускорений до допустимого значения необходимо уменьшить жесткость стабилизатора. При ее снижении на 42 % угол крена стал равен пре-

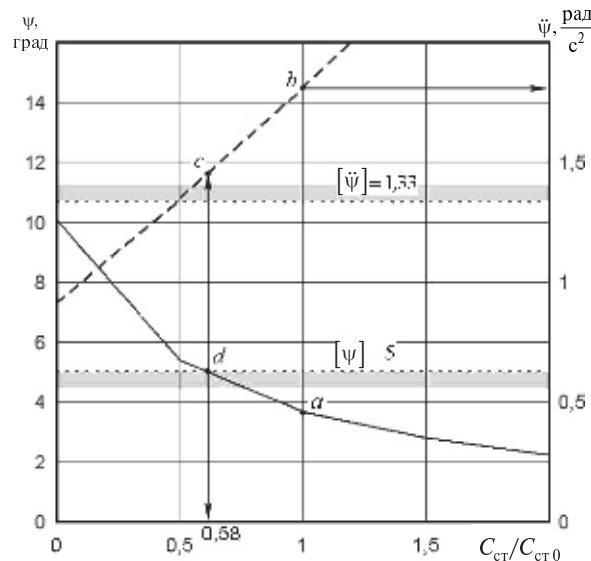


Рис. 2. Влияние жесткости стабилизатора передней подвески на поперечно-угловые перемещения (—) и поперечно-угловые ускорения (— —)

дельно допустимому значению (точка d рис. 2), а поперечно-угловые ускорения кузова уменьшились до значения $1,42 \text{ рад}/\text{с}^2$ (точка c рис. 2). Ввиду отсутствия возможности дальнейшего уменьшения жесткости стабилизатора (будет превышено предельно допустимое значение угла крена) на следующем шаге подбора параметров необходимо уменьшить угловую жесткость самой подвески.

Угловая жесткость передней подвески без стабилизатора. Для определения необходимой угловой жесткости подвески проведены расчеты при различных значениях C_y . В табл. 2 результаты расчета представлены в зависимости от относительной жесткости подвески C_y/C_{y0} . За номинальную жесткость подвески C_{y0} принято ранее получен-

Таблица 2

Поперечно-угловые перемещения и ускорения кузова в зависимости от жесткости подвески

Параметр	Значение параметра при стабилизаторе жесткости подвески C_y/C_{y0}				
	0,6	0,8	1	1,2	1,4
При извороте ($V = 30 \text{ км}/\text{ч}, R = 17,7 \text{ м}$)					
Угол крена ψ , град	6,80	5,75	5,00	4,43	3,99
При износке и изогнутости поверхности ($y_1 = 0,022 \text{ м}, l_1 = 10 \text{ м}$)					
Угловые ускорения $\ddot{\psi}$, $\text{рад}/\text{с}^2$	0,92	1,16	1,42	1,72	2,04

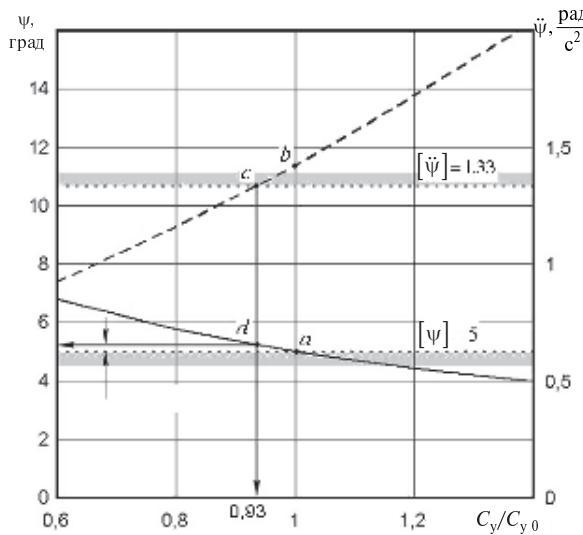


Рис. 3. Влияние угловой жесткости передней подвески:
на поперечно-угловые перемещения (—)
и поперечно-угловые ускорения (---)

ное значение $C_{y0} = C_{ya} = 24630$ (Н·м)/рад. При этом в расчетах использовалось скорректированное значение угловой жесткости стабилизатора $C'_{ct} = 0,58 \cdot C_{ct0} = 0,58 \cdot 14943 = 8667$ (Н·м)/рад.

По данным табл. 2 построены зависимости поперечно-угловых перемещений и ускорений кузова (рис. 3).

Полученные результаты позволяют сделать вывод: для того чтобы ускорения не превышали

пределенно допустимый уровень (точка *c* рис. 3), угловую жесткость подвески необходимо уменьшить на 7 %. При этом угол крена увеличится до значения 5,24 град (точка *d* рис. 3), что является приемлемым для заданных условий.

В итоге уточненные параметры подвески следующие:

угловая жесткость передней подвески без стабилизатора

$$C_{y,a} = 0,93 \cdot C_{y0} = 0,93 \cdot 24630 = 22906 \text{ (Н·м)/рад};$$

угловая жесткость стабилизатора передней подвески

$$C'_{ct,a} = C'_{ct} = 8667 \text{ (Н·м)/рад.}$$

Таким образом, угловая жесткость стабилизатора, рассчитанная по уточненной методике, отличается от полученной по общепринятой схеме расчета на 42 %. Это расхождение вызвано тем, что для рассматриваемого легкового автомобиля поперечно-угловые ускорения кузова оказались существенными, что подтверждает необходимость учета ускорений в поперечной плоскости при выборе параметров подвески.

Разработанная методика удобна в инженерном пользовании и позволяет на стадии проектирования обоснованно выбирать параметры подвески. В результате обеспечивается повышение технического уровня разрабатываемых автомобилей, а также снижение времени и затрат на доводку модернизируемых и вновь проектируемых систем подпрессоривания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полунгян, А.А. Проектирование полноприводных колесных машин. Т. 2 [Текст]: Учеб. для вузов / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Л.Ф. Жеглов [и др.]; Под общ. ред. А.А. Полунгяна. — М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2000. — 640 с.
2. Семенов, Н.В. Исследование поперечных

колебаний автомобиля [Текст] / Н.В. Семенов, В.Е. Ролле, А.Г. Семенов // Автомобильная промышленность. — 2008. № 7. — С. 31–33.

3. Тарасик, В.П. Теория движения автомобиля [Текст]: Учебник для вузов / В.П. Тарасик. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 478 с.: ил.

УДК 621.01

Н.А. Солодилова, И.Б. Челпанов

ТРЕХМЕРНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМ

В настоящее время наиболее разработаны автоматизированные методы реализации проектных процедур, используемых на этапах создания технического проекта и рабочей доку-

ментации. Автоматизируются в основном рутинные операции: выполнение расчетов, создание конструкторской и текстовой документации.



В зависимости от назначения, места в последовательности этапов разработки изделий, подробности представления, степени детализации и конкретной адресации выделяют [1] следующие типы схем: структурные, функциональные, принципиальные (полные), расположения. Еще один стандарт [2] относится к демонстрационным плакатам, которые широко применяются при для обучения персонала (например, водителей). Все эти, а также другие типы схем широко используются в практических и учебных материалах различных видов и уровней (учебники, учебные пособия, научно-техническая литература, практические руководства, описания технических устройств, инструкции по эксплуатации и ремонту, учебные и демонстрационные плакаты и т. п.). Между различными способами представления, как правило, нет четкой границы.

Формирование и способ представления разного рода схем для разнообразия технических объектов включает два основных этапа:

выбор условного словаря, упрощенных изображений типовых составных частей (их можно считать примитивами);

установление способов и правил изображения их взаимосвязей в технических устройствах.

В электротехнике и электронике система условных обозначений отрабатывалась и пополнялась преимущественно в течение семидесятых-восьмидесятых годов. Для условных обозначений в этой области имеются стандарты, их содержание отражается и дополняется в многочисленной справочной и учебной литературе. Отработанный язык изображения схем в определенных областях оказывается вполне достаточным и в известном смысле адекватным реальным объектам. Так, традиционным по графическому языку изображениям схем на плоскости в целом соответствовали и теперь соответствуют планарные технологии изготовления микросхем и их монтаж на плоских платах. Задачи пространственного монтажа и разнесения блоков в пространстве встречались и встречаются, но они явно второстепенны.

В машиностроении положение со схемами преимущественно иное, поскольку объемность, трехмерность как элементов, деталей, так и сборочных единиц различных уровней имеет здесь первостепенное значение. В таких условиях создан тоже хорошо и подробно разработанный, достаточно простой язык кинематических схем,

представленный, например, в учебном пособии [3], однако с плоским, сугубо условным и ненаглядным изображением элементов. Плоскость изображений часто не позволяет давать сколько-нибудь наглядное представление о пространственной структуре, составных частях, их взаимном положении и пространственной компоновке объекта.

В принципе полное представление обо всем этом дают чертежи в виде ортогональных проекций с необходимым числом разрезов и сечений. Значительной наглядностью обладают аксонометрические проекции также с необходимым числом разрезов и сечений. В течение последнего десятилетия получили широкое распространение трехмерные 3D-модели, создаваемые средствами САПР (Pro ENGINEER, Solid Works, КОМПАС и т. п.). В настоящее время использование 3D-моделей, которые можно рассматривать с различных точек, проводить их виртуальную разборку и сборку и пр., при конструировании и изготовлении в определенных отраслях стало обязательным. Несомненное преимущество трехмерных виртуальных моделей — это возможность создания виртуальной модели еще не существующего физического изделия и окружающей среды с обзором его с любой стороны под разными углами, виртуальным проникновением в него, созданием прозрачных стенок отдельных деталей, с освещением с различных сторон источниками света и т. д. [4].

Построение объемных, пространственных образов принципиальных трудностей не вызывает, поскольку при этом копируется и наглядно представляется реальная геометрия поверхностей изделий. Это было исключительно положительно воспринято производственниками. Правда, дело дошло до того, что конструкторы, технологи и производственники стали плохо читать чертежи, без 3D-моделей практически стало невозможно изготовление. Подобный процесс перехода к трехмерному представлению не наблюдался в области схематичных представлений. Схемы очень часто оставались плоскими, что и раньше затрудняло их восприятие. В связи с этим уместно поставить вопрос о необходимости построения в машиностроении 3D-схем различных типов, с тем чтобы их можно было поворачивать для рассматривания с различных точек, включать новые элементы или исключать иные, строить расчетные конфигурации и т. п. Произ-

водимые российскими предприятиями высокотехнологичные и наукоемкие изделия, выходящие на внешний рынок, согласно современным требованиям должны сопровождаться электронной технической документацией, выполненной в соответствии с международным стандартом на ее подготовку «Интерактивное электронное техническое руководство (ИЭТР)» (в соответствии с Рекомендациями по стандартизации Госстандарта РФ Р 50.1.029.2001 и Р 50.1.030.2001 [5, 6, 7]). ИЭТР применяется, в частности, для обеспечения эксплуатирующей организации справочным материалом об устройстве и принципах работы изделия. Составной частью такого материала являются различные схемы изделия, и обеспечение их наглядности — важнейшая задача.

В практике построения принципиальных, кинематических, конструктивных, функциональных и иных схем дела обстоят не лучшим образом. Общая методология до сих пор отсутствует. К тому же при разработке схем как «вручную», так и с использованием средств САПР используется только изображение в плоскости. Если даже возможно представлять их взаимное расположение в аксонометрии, то плоские изображения самих элементов для этого не приспособлены.

Не было разработок по методологии начальных этапов проектирования, связанных с проектированием трехмерных схем машин. Некоторые современные пакеты прикладных программ для автоматизации процесса проектирования, благодаря наличию баз данных стандартных элементов, позволяют частично автоматизировать процесс создания кинематических схем, но речь в данном случае идет только о плоских изображениях, которые не пригодны для встраивания в 3D-модели. Решение в пользу того или иного варианта проекта нередко принимается не разработчиком. В этом случае наглядность представления вариантов, которую обеспечивает только трехмерное моделирование, может способствовать лучшему пониманию и оценке проектного замысла, значительно облегчить процесс выбора оптимального решения.

Схемы современных машин зачастую настолько сложны, что требуют для их чтения специальной подготовки в части, касающейся как «схемной символики», так и глубоких общепрофессиональных знаний механики, пневматики,

гидравлики, электротехники, электроники и других дисциплин [3]. Наличие в таких схемах редко встречающихся элементов, типовые условные изображения которых не обладают наглядностью, при пространственной компоновке значительно усложняет этот процесс.

Мы поставили цель сформулировать принципы формирования трехмерных схем технических устройств и проработать их применительно к изображениям механизмов и машин различного назначения. В первую очередь необходимо создание совокупностей примитивов, алфавита изобразительного языка (словарь типовых элементов) для упрощенного трехмерного изображения схем. Фактически необходимо создать лаконичный графический язык объемных схем разных видов (кинематические, пневматические, электрические, технологические и т. д., комбинированные). Этот язык должен быть, с одной стороны, понятен широкому кругу лиц, сталкивающихся с необходимостью читать схемы, а с другой стороны, — иметь возможность отразить конструктивные и функциональные особенности изделия.

В связи с этим необходимо:

создать комплексы трехмерных примитивов типовых элементов и систем, которые должны быть наглядны в разных ракурсах, приспособлены для компьютерных технологий при использовании распространенного программного обеспечения (при этом можно отдавать приоритет или иллюстрированию функционального назначения, или показу принципа действия, или устройству как сборочной единицы, или внешнему виду с характерными особенностями);

наметить пути использования различных эффектов при построении примитивов и выработать соответствующие рекомендации;

разработать методики построения трехмерных схем разной степени сложности и при различных вариантах взаимодействия и компоновки либо «от нуля» (основываясь только на концепции построения), либо при упрощении и трансформации уже имеющихся 3D-моделей изделий, либо по результатам переработки чертежей.

Проблемы изображения трехмерных элементов схем зависят от вида схематизируемых объектов.

Так, при изображении 3D кинематических схем целесообразно придерживаться европей-



ских стандартов, рекомендующих даже для плоских элементов кинематики показывать «конструктив». Схема не должна загромождаться излишними конструктивными нюансами, элементы должны быть предельно просты. Но, с другой стороны, для облегчения восприятия желательно приблизить модель элемента к реальному виду. В качестве примера в таблице приведены плоские условные обозначения некоторых элементов и их возможное 3D отображение.

Возникают ситуации, когда элементы имеют одно и то же назначение и схожий внешний вид, но отличаются друг от друга принципом дей-

ствия (например, датчики положения), что необходимо отразить в кинематической схеме. Наоборот, могут быть одинаковы принцип действия и внешний вид элементов (как в случае с подшипниками качения), но области применения различны, что влечет за собой наличие конструктивных особенностей, также требующих отражения в кинематической схеме изделия. В этих случаях, видимо, не избежать применения таких средств отображения и редактирования модели, как изменение цвета отдельных частей элемента, фактуры поверхности элемента, отображение невидимых ребер и поверхностей, возможность

Условные обозначения и 3D отображения некоторых элементов кинематических схем

Наименование	Условное обозначение	3D условное обозначение
Глухая муфта		
Компенсирующая муфта: изогнутая		
Упругая муфта: кулонковая		

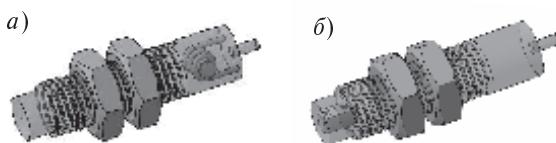


Рис. 1. Датчики положения:
а — индуктивный; б — магнитный

изменения оптических свойств; использование средств анимации и т. п. (рис.1).

Вместе с этим желательно выработать единый стиль оформления пространственных схем, что позволит увеличить скорость восприятия информации.

При изображении элементов 3D пневматических схем также необходимо делать выбор в пользу упрощенного конструктивного представления. Вместе с тем необходимо придерживаться основных правил, действующих в плоских пневматических схемах. Так, однотипные элементы изображаются на одном горизонтальном уровне схемы, цилиндры и распределители должны по возможности располагаться горизонтально, линии трубопроводов должны быть прямыми, параллельными, желательно без пересечений и т. д. При необходимости направление потока воздуха можно изобразить объемной стрелкой, цифровые и буквенные обозначения элементов и каналов — объемным текстом.

Для изделия, в состав которого входят элементы разных видов, помимо схем соответствующих видов одного типа, например таких, как «схема электрическая принципиальная» и «схема пневматическая принципиальная», разрабатывают комбинированную схему, содержащую элементы и связи разных видов. Такая схема помогает видеть будущую машину в целом, а не по частям. При изучении уже готовой машины по техническим описаниям и инструкциям по эксплуатации наиболее полное и наглядное представление об устройстве и принципе действия машины также дает комбинированная схема.

В качестве примера, иллюстрирующего удобство чтения и наглядность 3D комбинированных схем, рассмотрим схему автомата сборки маркеров [1]. Эта схема представляет собой сочетание принципиальной кинематической схемы механизма, компоновочной схемы, принципиальной пневматической схемы привода, структурной схемы устройства управления. «Плоский» вариант схемы представлен на рис. 2.

Привод поворотного стола 1 осуществляется мотор-редуктором 2 через механизм малтийского креста 3. Датчик положения стола D_5 служит для синхронизации работы механизмов машины с работой стола. Привод шибера 4 осуществляется пневмоцилиндром 1.0. Шибер 4 движется в прямоугольных направляющих. Датчики D_1 и D_2 контролируют крайние положения поршня пневмоцилиндра и, соответственно, шибера. Зажим корпуса маркера осуществляется пружиной 5, разжим — пневмоцилиндром 2.0. Датчик D_4 контролирует раскрытие прижима. Управление работой автомата ведется контроллером по крайним положениям механизмов (по сигналам датчиков).

На рис. 3 представлена та же схема, только в 3D отображении.

Конечно, преимущества 3D отображения большей частью проявляются, когда модель просматривается в среде графического редактора, и зависят от возможностей редактора. Речь идет о таких сервисных функциях, уже упоминавшихся выше, как обзор объекта с любой стороны под разными углами, виртуальное проникновение в него, создание прозрачных стенок отдельных деталей, освещение различными источниками и т. д. Можно также не загромождать схему нумерацией и характеристиками объектов, а пользоваться выделением (подсветкой) элемента, выбранного в дереве модели (элементный состав схемы).

Из 3D комбинированной схемы легко получить схему другого вида, исключив ненужные компоненты.

Если на комбинированной схеме необходимо уделить больше внимания какой-то ее части в контексте всей машины (допустим, в случае оценки проектируемого изделия специалистом в какой-то конкретной области), возможно изменение масштаба отображения определенных элементов.

И, конечно же, наибольшую степень наглядности, но и дополнительные трудности при разработке 3D модели могут создать анимационные сцены работы изделия, его эксплуатации и обслуживания.

Таким образом, необходимо создание и хорошая организация библиотек стандартных объемных элементов схем, баз данных типовых схем, которые следует постоянно поддерживать и расширять за счет добавления новых документов.

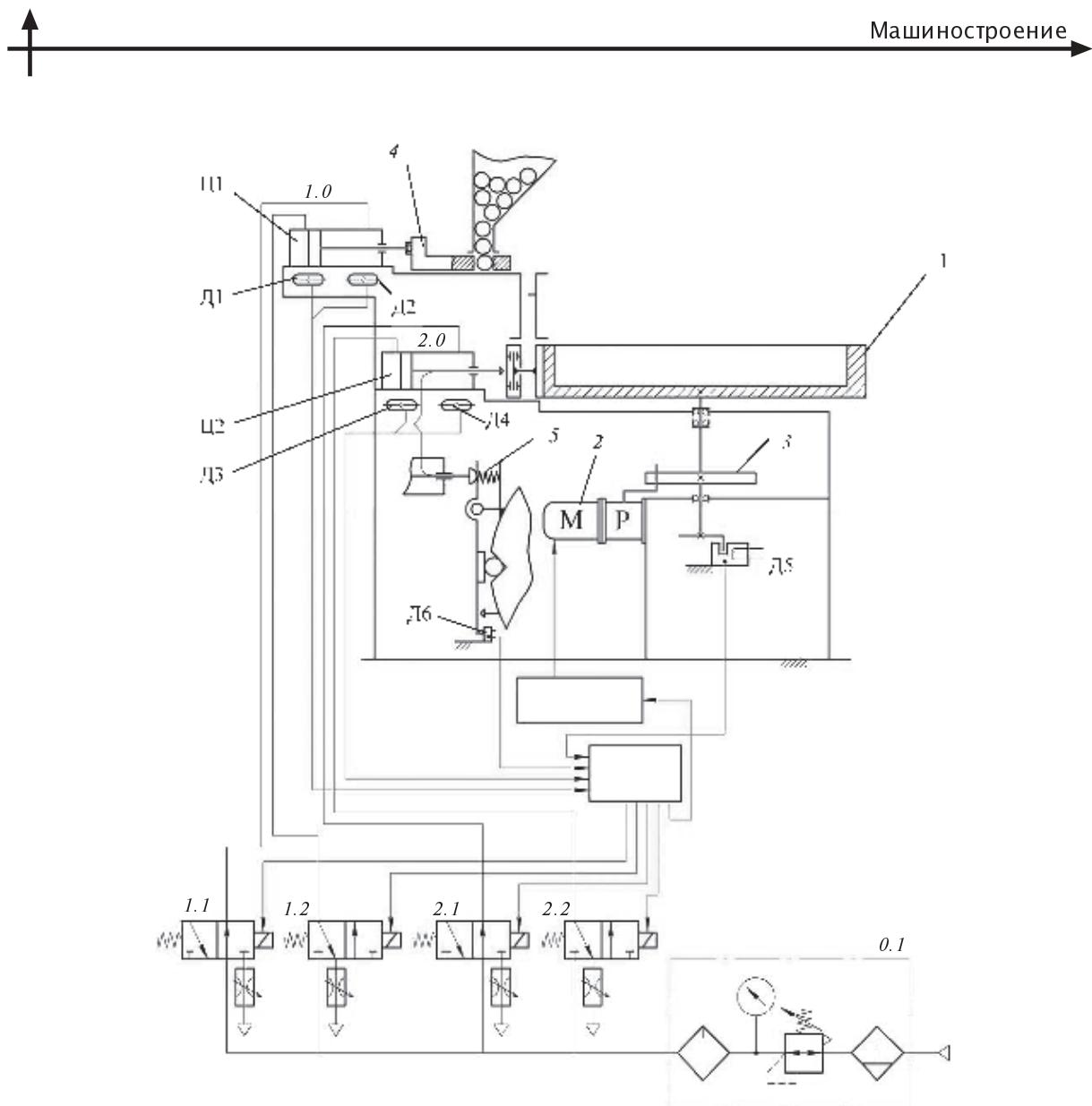


Рис. 2. Двумерная комбинированная схема автомата

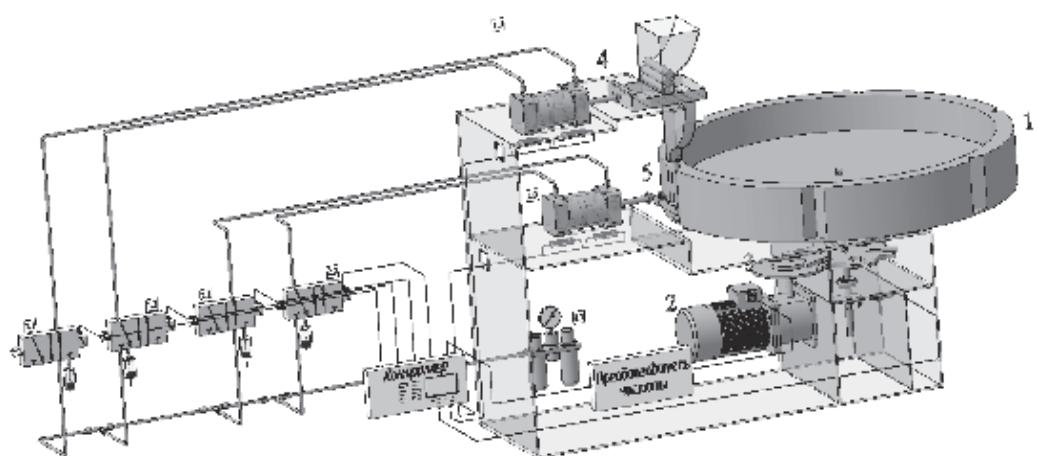


Рис. 3. Трехмерная комбинированная схема автомата

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2.701–84. ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению.
2. ГОСТ 2.605–68. Плакаты учебно-технические. Общие технические требования
3. Технологические машины и оборудование. Схемы кинематические, пневматические, гидравлические, электрические, комбинированные [Текст]: Учеб. пособие / С.В. Павлюченко [и др.] ; под общ. ред. В.А. Дьяченко. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 168 с.
4. Хитров, И. 3D-инструментарий для электронной документации [Текст] / И. Хитров // САПР и графика.— 2003. № 5.
5. Муромцев, Ю.Л. Концептуальное моделирование в задачах экономической эффективности, конкурентоспособности и устойчивого развития: монография / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, В.А. Погонин, В.Н. Шамкин. — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. — 176 с.
6. Сидорук, Р.М. Исследование промышленных графических информационных технологий для создания ИЭТР [Текст] / Р.М. Сидорук, С.Е. Власов, Л.И. Райкин, А.А. Титов // Информационные технологии: научно-технический и научно-производственный журнал. 2005. № 4.
7. Сидорук, Р.М. Виртуальные и анимационные модели в интерактивных электронных технических руководствах [Текст] / Р.М. Сидорук, Л.И. Райкин, А.А. Титов // CADmaster.— 2007. № 38/3.

УДК 625.816

О.Н. Мацко

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНОГО ПРУЖИННОГО АККУМУЛЯТОРА С ПОСТУПАТЕЛЬНОЙ ПАРОЙ

В статье представлены результаты разработки технической идеологии создания мехатронных пневматических рекуперативных приводов для возвратно-поступательных перемещений с использованием пружинных аккумуляторов, имеющих нелинейные силовые характеристики в функции от величины перемещения.

Один из эффективных способов энергосбережения — применение рекуперативных приводов с пружинным аккумулятором, которым посвящены работы [2–4].

Рассматриваемый пружинный аккумулятор с выходным звеном, совершающим прямолинейное перемещение и не имеющим конфигураций с неустойчивым равновесием, служит основой привода, габаритный размер которого в направлении рабочего хода значительно меньше габаритного размера привода на базе бесштокового пневмоцилиндра. Для этого типа приводов целесообразно использовать фиксаторы, обеспечивающие или управляемый выстой, или сохранение текущей конфигурации при выключении привода.

Для предложенных мехатронных рекуперативных приводов было выполнено исследование характеристик, позволившее разработать методики расчета параметров пружинных аккумуляторов. Оно проводилось без учета диссипативных сил.

Нелинейный пружинный аккумулятор с поступательной парой, изображенный на рис. 1, предназначен для применения в рекуперативных приводах технологического оборудования.

По направляющей 1 двигается ползун 2 массой m . Пружина растяжения 3 шарнирно соединена с основанием 4 и ползуном 2. В среднем положении ползуна, когда пружина 3 перпендикулярна направляющей 1, усилие пружины равно нулю.

Для упрощения представим данный аккумулятор в виде схемы (рис. 2).

Для корректного сравнения различных конструктивных решений за базовую модель примем рекуперативный привод на базе линейного пружинного аккумулятора [5] с максимальной накопленной потенциальной энергией



Рис. 1. Нелинейный пружинный аккумулятор для рекуперативных приводов

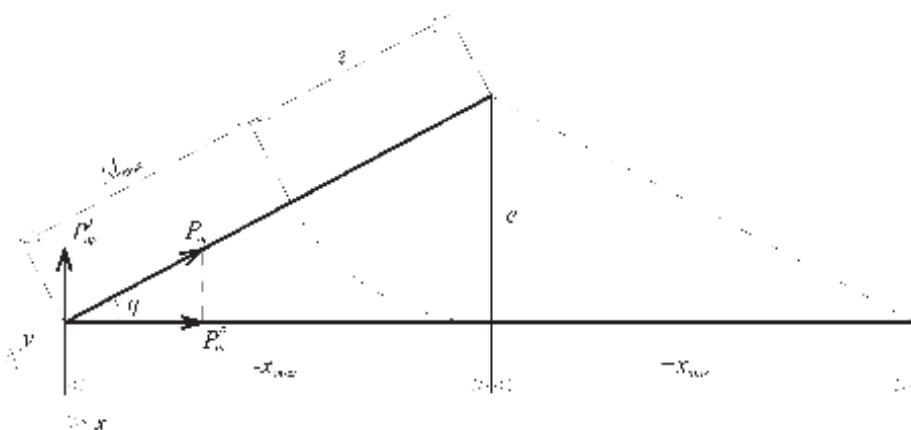


Рис. 2. Схема пружинного аккумулятора

$$V_{\max} = \frac{1}{2} c \Delta l_{\max}^2, \quad (1)$$

где c — жесткость пружины базовой модели линейного пружинного аккумулятора (ЛПА); Δl_{\max} — максимальное удлинение пружины, когда ползун находится в одном из крайних положений, т. е. для базовой модели оно равно максимальному перемещению ползуна, $\Delta l_{\max} = x_{\max}$.

Максимальная кинетическая энергия базовой модели аккумулятора равна

$$E_{\max} = \frac{1}{2} m \Delta l_{\max}^2 = \frac{1}{2} m x_{\max}^2. \quad (2)$$

Для каждого конструктивного решения значение x_{\max} выбирается равным значению базовой модели, а жесткость пружины определяется из условия равных максимальных потенциальных энергий базовой модели и нелинейного пружинного аккумулятора (НПА):

$$V_{\max} = V_{\max}^{\text{HA}},$$

$$\frac{1}{2} c \Delta l_{\max}^2 = \frac{1}{2} c_{\text{HA}} \Delta l_{\max}^2,$$

где Δl_{\max} — максимальное удлинение (укорочение) пружины при $x = x_{\max}$; c_{HA} — жесткость пружины НПА

Пренебрегая массой пружины и добавочными конструктивными элементами, во всех конструктивных исполнениях будем иметь (без учета диссипативных потерь) одну и ту же максимальную скорость ползуна.

Определим теперь соотношение жесткостей пружин нелинейного аккумулятора с выходным поступательным звеном и базового линейного аккумулятора:

$$K_c = \frac{c_{\text{HA}}}{c} = \frac{x_{\max}^2}{\Delta l_{\max}^2}. \quad (3)$$

Как видно из рис. 2, максимальное удлинение пружины равно

$$\Delta l_{\max} = \sqrt{x_{\max}^2 + e^2} - e,$$

или

$$\Delta l_{\max} = x_{\max} \sqrt{1 + \left(\frac{e}{x_{\max}} \right)^2} - e, \quad (4)$$

где e — длина пружины в состоянии устойчивого равновесия (в данном случае — перпендикулярно направляющей).

Введем геометрический коэффициент

$$K_e = \frac{e}{x_{\max}}. \text{ Тогда } \Delta l_{\max} = x_{\max} (\sqrt{1 + K_e^2} - K_e).$$

С учетом (3) и после дополнительных преобразований получаем, что жесткость нелинейного пружинного аккумулятора равна

$$c_{\text{НА}} = \frac{c}{\left(\sqrt{1 + K_e^2} - K_e \right)}. \quad (5)$$

Тогда исходя из выражения (3) соотношение жесткостей пружин базовой модели и НПА будет равно

$$K_c = \frac{1}{(\sqrt{1 + K_e^2} - K_e)^2}. \quad (6)$$

График зависимости $K_c = f(K_e)$ для $K_e \in (0,1-1)$ представлен на рис. 3.

Если ввести коэффициент удлинения пружины, представляющий собой соотношение

$K_y = \frac{S'_3}{d_{\text{пр}}}$, где $d_{\text{пр}}$ — диаметр проволоки пружины (принимается по ГОСТ 13766—86); S'_3 — наибольший прогиб одного витка (принимается по ГОСТ 13766—86), то для пружины растяжения максимальное удлинение равно

$$\Delta l_{\max} = eK_y. \quad (7)$$

Анализ геометрических параметров пружин показывает, что отношение максимального прогиба одного витка к диаметру проволоки пружины (коэффициент удлинения K_y) лежит в диапазоне от 0,2 до 4,25, что в первом приближении позволяет принять рекомендуемый диапазон удлинения от 1,0 до 3,8. В этих пределах мы исследуем изменение основных характеристик нелинейных пружинных аккумуляторов.

Для сравнительной оценки всего множества возможных вариантов примем максимальный ход ползуна за единичный.

Тогда размер e определяется из условия единичного хода следующим образом (см. рис. 2):

$$e = \frac{1}{K_y \sqrt{1 + \frac{2}{K_y}}}. \quad (8)$$

График зависимости начальной длины пружины e от коэффициента удлинения K_y представлен на рис. 4.

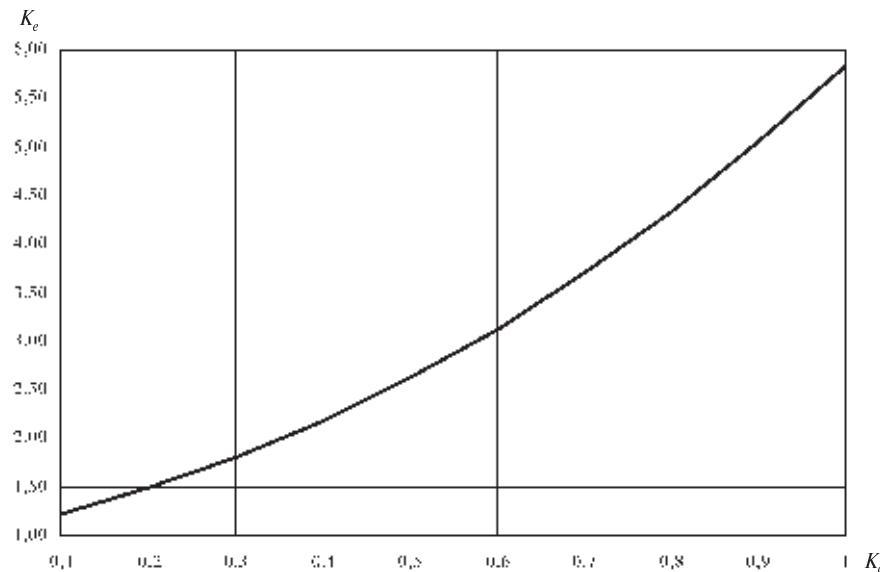


Рис. 3. Зависимость соотношения жесткостей пружин базовой модели и НПА от геометрического коэффициента K_e

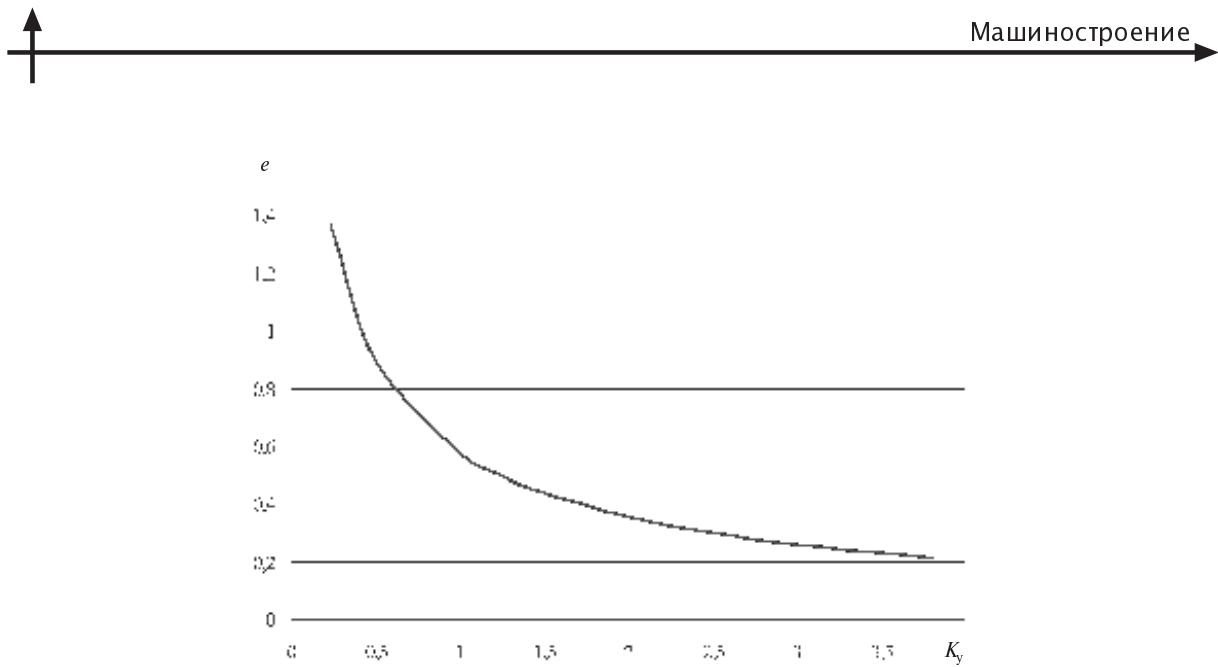


Рис. 4. Зависимость начальной длины пружины
от коэффициента удлинения K_y

Определим теперь зависимость скорости движения ползуна нелинейного пружинного аккумулятора от значения координаты x через уравнение полной энергии системы, пренебрегая диссипативными силами:

$$\frac{1}{2}c_{\text{HA}}\Delta l_{\max}^2 = \frac{1}{2}c_{\text{HA}}\Delta l^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}^2, \quad (9)$$

где Δl — текущее удлинение пружины; \dot{x} — текущая скорость ползуна.

Произведя необходимые преобразования, получим

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{c_{\text{HA}}}{m}(\Delta l_{\max}^2 - \Delta l^2)}, \quad (10)$$

или с учетом рис. 2 и формулы (5)

$$\dot{x} = \frac{\sqrt{cm}}{\sqrt{1+K_e^2} - K_e} \times \sqrt{K_y^2 e^2 - x^2 - 2e^2 + 2e\sqrt{e^2 + x^2}}. \quad (11)$$

Построим график зависимости $\dot{x} = f(x)$ для $x \in (-1; +1)$, т. е. в данном случае в крайних положениях аккумулятора $x_{\max} = 1$ и $x_{\max} = -1$ (рис. 5).

Как видно по рис. 2, усилие пружины $P_{\text{пр}}$ можно разложить на две составляющие: горизон-

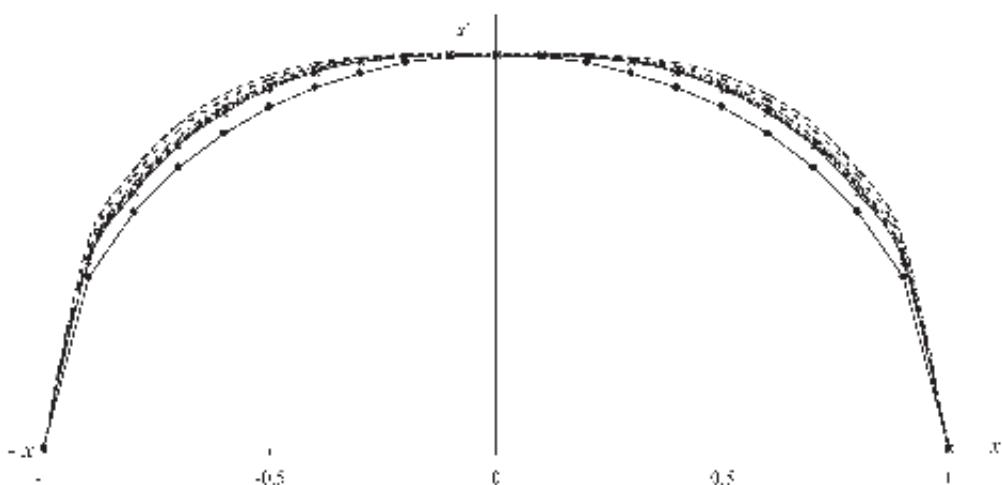


Рис. 5. Текущая скорость \dot{x} ползуна в диапазоне между крайними его положениями
(--- $K_y = 1,5/e = 0,44$; - - - $K_y = 1,0/e = 0,58$; — $K_y = 2,0/e = 0,35$;
- · - $K_y = 2,5/e = 0,30$; — $K_y = 3,0/e = 0,26$; * $K_y = 3,8/e = 0,21$; —• ЛПА)

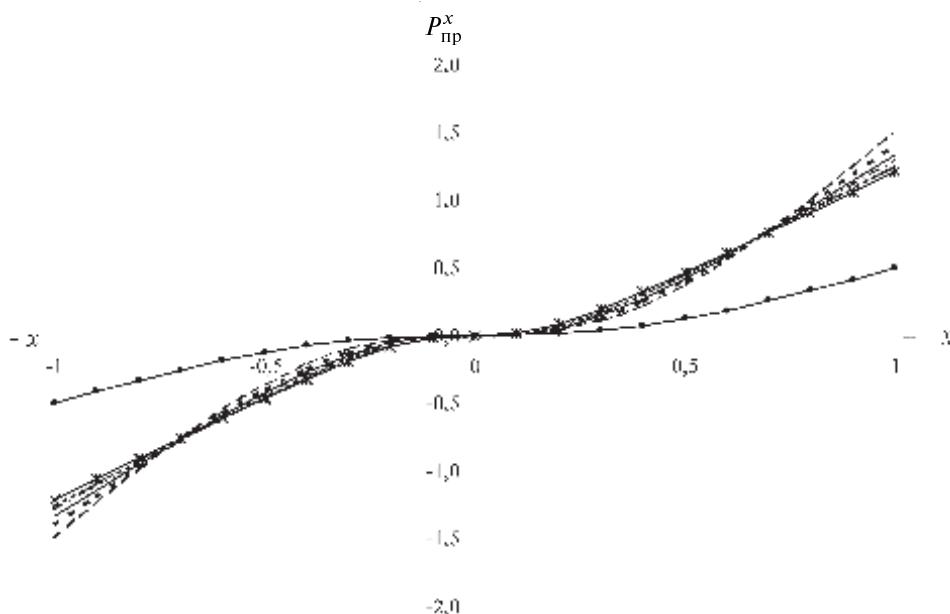


Рис. 6. Зависимость ускорения ползуна $P_{\text{пр}}^x$ от текущего перемещения x
 $(\dots \dots K_y = 1,0/e = 0,58; \dots \dots K_y = 1,5/e = 0,44; \dots \dots K_y = 2,0/e = 0,35; \dots \dots K_y = 2,5/e = 0,3;$
 $\text{——} K_y = 3,0/e = 0,26; \text{——} \star K_y = 3,8/e = 0,21; \text{——} \text{ЛПА})$

тальную $P_{\text{пр}}^x$ и вертикальную $P_{\text{пр}}^y$. Горизонтальная составляющая представляет собой усилие, действующее на ползун в направлении его движения, а вертикальная — нагрузку на направляющие.

Если принять массу ползуна и рабочего органа постоянными, то по точно такому закону изменяется и ускорение ползуна. Во многих практических приложениях наличие ограничений на максимальное ускорение может оказывать влияние на выбор конструктивных параметров аккумулятора и привести к снижению быстродействия.

Найдем ускорение ползуна, т. е. зависимость горизонтальной составляющей усилия пружины $P_{\text{пр}}^x$ от перемещения ползуна x , через проекцию усилия пружины на ось абсцисс:

$$P_{\text{пр}}^x = P_{\text{пр}} \cos q, \quad (12)$$

где $P_{\text{пр}}$ — текущее усилие пружины; q — угол между пружиной и направляющей.

Текущее усилие пружины равно

$$P_{\text{пр}} = c_{\text{HA}} \Delta l. \quad (13)$$

Тогда

$$P_{\text{пр}}^x = \frac{c}{(\sqrt{1 + K_e^2} - K_e)^2} x \left(1 - \frac{e}{\sqrt{e^2 + x^2}} \right). \quad (14)$$

Чтобы понять, как меняется ускорение $P_{\text{пр}}^x$ в зависимости от текущего перемещения ползуна (координаты x), построим график зависимости (14) (рис. 6).

К параметрам (характеристикам) рекуперативного привода также относится время перемещения ползуна из одного крайнего положения в другое (полупериод колебаний). Его можно найти, если взять следующий интеграл:

$$\frac{T}{2} = \int_{-x}^{+x} \frac{dx}{\dot{x}(x)}.$$

В результате исследования характеристик нелинейного пружинного аккумулятора с поступательной парой были в безразмерном виде определены законы изменения скорости и ускорения в зависимости от конструктивных параметров системы, решена задача определения полупериода колебаний системы, а также установлена связь между геометрическими параметрами рассматриваемого пружинного аккумулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вульфсон, И.И. Колебания в машинах [Текст]: Учеб. пособие для ВТУЗов. / И.И. Вульфсон; СПбГУТД.— Изд. 2-е, доп.— СПб., 2006.— 260 с.
2. Жавнер, В.Л. Рекуперативные приводы с нелинейными аккумуляторами для цикловых промышленных роботов пищевой промышленности [Текст] / В.Л. Жавнер, Ю.А. Бойцов, Н.А. Феоктистова // Интенсификация процессов, оборудование и управление пищевых производств: Межвуз. сб. науч. тр.— Л.: Изд-во ЛТИХП, 1991.— С. 77.
3. Кореняев, А.И. Манипуляционные системы роботов [Текст] / А.И. Кореняев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес [и др.].— М.: Машиностроение, 1989.— С. 279–286.
4. Крупенин, В.Л. Манипуляционные системы резонансного типа [Текст] / В.Л. Крупенин, Т.С. Акинфеев, В.И. Бабицкий // Машиноведение.— 1982. № 1.— С. 2–8
5. Тимошенко, С.П. Теория колебаний в инженерном деле [Текст] / С.П. Тимошенко.— М.-Л.: ГНТИ, 1932.— 344 с.

УДК 631.3.022

И.А. Будашов

МОЩНОСТЬ РЕЗАНИЯ РОТАЦИОННО-ДИСКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР

Основными недостатками выпускаемых измельчителей являются повышенный расход энергии, низкая производительность, быстрое затупление режущих кромок рабочих органов, несоответствие измельченного продукта зоотехническим требованиям. Кроме того, многие измельчители неудовлетворительно работают на кормах повышенной влажности.

Для устранения этих недостатков необходим дальнейшее совершенствование процесса измельчения незерновой части урожая и изыскания новых конструктивных решений, обеспечивающих не только повышение качества измельченного материала, но и снижение расхода

энергии, увеличение долговечности измельчителей за счет совершенствования рабочих органов.

Для лучшего понимания того, как влияет лезвие ножа сегментного типа на резание толстостебельных культур, нами были спроектированы и изготовлены три специальных ножа, отличающихся друг от друга формой лезвия (рис. 1) [1].

В ходе исследований публикаций по теории резания лезвием и сопротивлению материалов автор вывел формулы нормальной составляющей критической силы резания толстостебельных культур применительно к каждому из представленных ножей.

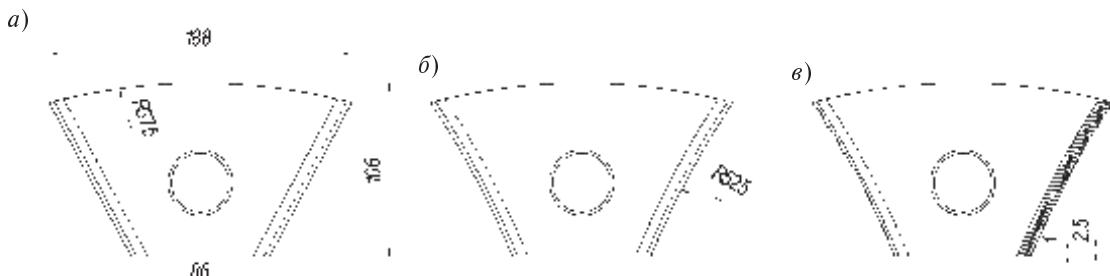


Рис. 1. Экспериментальные ножи:
а — с прямым лезвием; б — с криволинейным лезвием; в — с насечкой лезвия

Для прямого и криволинейного лезвия при бесподпорном резании толстостебельных культур нормальную составляющую критической силы резания N , Вт, вычисляют по формуле

$$N = \frac{50\delta s\sigma_p H^3 + 0,02344 f E \pi d^4 \cos \varphi \cos^3 \gamma K n \cos \alpha}{K n \cos \alpha H^3},$$

где δ — толщина (острота) лезвия, м; s — подача, м/с; σ_p — нормальные (контактные) разрушающие напряжения, возникающие в перерезаемом стебле, Н/м² [2]; H — высота резания, м; f — стрела прогиба стебля, м; E — модуль упругости стебля при растяжении, Н/м²; d — диаметр стебля, м; φ — угол скользящего резания, град.; γ — угол отклонения от вертикали по направлению подачи, град.; K — число ножей; n — число оборотов диска с ножами в минуту; α — угол между кромкой лезвия ножа и направлением подачи стеблей при наиболее нагруженной позиции активной части лезвия, град. Для лезвия с насечкой при бесподпорном резании толстостебельных культур нормальную составляющую критической силы резания N , Вт, вычисляют по формулам

$$N = \frac{A}{K n \cos \alpha H^3},$$

$$A = 58,5\delta s\sigma_p H^3 + 0,02344 f E \pi d^4 \cos \varphi \cos^3 \gamma K n \cos \alpha.$$

Если разрешающей способности измерительного инструмента для определения отличия величины стерни L от высоты среза H на определенном этапе будет недостаточно, т. е. не будет возможности определить очень малую величину f (это произойдет, если прогиб стебля по сравнению с высотой резания будет очень мал при угле поворота в плоскости среза меньше 0,5°), то расчет критической силы будем производить через угол поворота сечения. Критическим условием будем считать определение, изложенное в [3], при котором разрушение пролета (в нашем случае стебля) начнется при превышении прогибом доли

$\frac{1}{1000}$ пролета, т. е. при $f = H/1000$. Для углов поворота сечения не больше 1° принято считать [4], что тангенс угла равен углу, выраженному в радианах. Отсюда следует, что разрушение может произойти при

$$\Theta = \operatorname{tg} \Theta = \frac{df}{dH} = \frac{dH}{dH \cdot 1000} = 0,001 \text{ рад},$$

где Θ — угол поворота стебля в плоскости среза.

Тогда для прямого и криволинейного лезвия, при бесподпорном резании толстостебельных культур, нормальную составляющую критической силы резания N , Вт, вычисляют по формуле

$$N = \frac{3200\delta s\sigma_p H^2 + \Theta E \pi d^4 \cos \varphi \cos^2 \gamma K n \cos \alpha}{32 K n \cos \alpha H^2},$$

а для лезвия с насечкой при бесподпорном резании

$$N = \frac{3743,98502\delta s\sigma_p H^2 + \Theta E \pi d^4 \cos \varphi \cos^2 \gamma K n \cos \alpha}{32 K n \cos \alpha H^2}.$$

Для прямого и криволинейного лезвия при подпорном резании толстостебельных культур нормальную составляющую критической силы резания N , Вт, вычисляют по формуле

$$N = \frac{1600\delta s\sigma_p a(H+a) + \Theta E \pi d^4 \cos \varphi \cos^2 \gamma K n \cos \alpha}{16 K n \cos \alpha a(H+a)},$$

(где a — зазор между подвижным и неподвижным ножом, м), а для лезвия с насечкой при подпорном резании

$$N = \frac{1872\delta s\sigma_p a(H+a) + \Theta E \pi d^4 \cos \varphi \cos^2 \gamma K n \cos \alpha}{16 K n \cos \alpha a(H+a)}.$$

Для преодоления равнодействующей R сопротивлений в соответствии с рис. 2 требуется приложить со стороны ножа равную ей и противоположно направленную силу P_{kp} , составляющими которой являются окружное усилие P , направленное перпендикулярно радиус-вектору r , и усилие P_1 , действующее по направлению радиус-вектора. Угол между радиус-вектором и лезвием ножа равен углу скольжения τ . Критическую силу P_{kp} можно разложить на составляющие: нормальную к лезвию N и касательную T , направленную по лезвию. Сила R всегда отклонена от нормали на угол φ , равный углу трения между лезвием ножа и материалом.

Уравнение моментов составляющих критической силы относительно оси вращения диска:

$$M_{kp} = Nr \cos \tau + Tr \sin \tau.$$

Учтя, что $T = f'N$, и сделав соответствующее тригонометрическое преобразование, получим



$M_{kp} = Nr \cos \tau + Nf'r \sin \tau = Nr \cos \tau(1 + f' \operatorname{tg} \tau)$,
где f' — коэффициент скользящего резания [5].

Мощность, требуемая для резания:

$$N_{pe3} = M_{kp} \omega = Nr \cos \tau(1 + f' \operatorname{tg} \tau) \frac{\pi n}{30},$$

где ω — угловая скорость, рад/с.

В то же время $f' = k \operatorname{tg} \tau$ [2] и $\varphi = \arctg f' = \arctg(k \operatorname{tg} \tau)$ [6], где $k = 0,325$ — коэффициент пропорциональности [7].

Следовательно, потребляемую мощность резания при бесподпорном резании толстостебельных культур в случаях прямого и криволинейного лезвия можно определить по формуле

$$\begin{aligned} N_{pe3} &= \\ &= \frac{50\delta s \sigma_p H^3 + 0,02344 f E \pi d^4 \cos \varphi \cos^3 \gamma K n \cos \alpha}{K n \cos \alpha H^3} \times \\ &\quad \times r \cos \tau (1 + k \operatorname{tg}^2 \tau) \frac{\pi n}{30} = \\ &= \frac{A}{K n \cos \alpha H^3} \times r \cos \tau \pi n (1 + k \operatorname{tg}^2 \tau); \\ A &= 1,6 \delta s \sigma_p H^3 + 0,00078 f E \pi d^4 \times \\ &\quad \times \cos [\arctg(k \operatorname{tg} \tau)] \cos^3 \gamma K n \cos \alpha; \end{aligned}$$

при бесподпорном резании для лезвия с насечкой

$$\begin{aligned} N_{pe3} &= \\ &= \frac{58,5 \delta s \sigma_p H^3 + 0,02344 f E \pi d^4 \cos \varphi \cos^3 \gamma K n \cos \alpha}{K n \cos \alpha H^3} \times \\ &\quad \times r \cos \tau (1 + k \operatorname{tg}^2 \tau) \frac{\pi n}{30} = \\ &= \frac{B}{K n \cos \alpha H^3} \times r \cos \tau \pi n (1 + k \operatorname{tg}^2 \tau); \\ B &= 1,95 \delta s \sigma_p H^3 + 0,00078 f E \pi d^4 \times \\ &\quad \times \cos [\arctg(k \operatorname{tg} \tau)] \cos^3 \gamma K n \cos \alpha; \end{aligned}$$

при подпорном резании для прямого и криволинейного лезвия

$$\begin{aligned} N_{pe3} &= \\ &= \frac{1600 \delta s \sigma_p a (H + a) + \Theta E \pi d^4 \cos \varphi \cos^2 \gamma K n \cos \alpha}{16 K n \cos \alpha a (H + a)} \times \\ &\quad \times r \cos \tau (1 + k \operatorname{tg}^2 \tau) \frac{\pi n}{30} = \end{aligned}$$

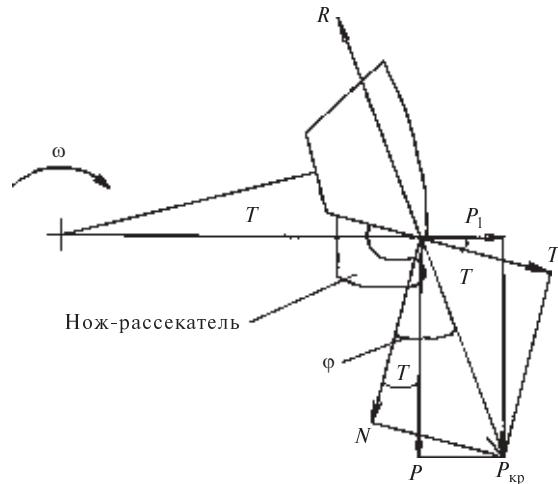


Рис. 2. Схема сил, учитываемых при определении потребляемой мощности резания

$$\begin{aligned} &= \frac{D}{480 K n \cos \alpha a (H + a)} \times \\ &\quad \times r \cos \tau \pi n (1 + k \operatorname{tg}^2 \tau); \\ D &= 1600 \delta s \sigma_p a (H + a) + \\ &+ \Theta E \pi d^4 \cos [\arctg(k \operatorname{tg} \tau)] \cos^2 \gamma K n \cos \alpha; \end{aligned}$$

при подпорном резании для лезвия с насечкой

$$\begin{aligned} N_{pe3} &= \\ &= \frac{1872 \delta s \sigma_p a (H + a) + \Theta E \pi d^4 \cos \varphi \cos^2 \gamma K n \cos \alpha}{16 K n \cos \alpha a (H + a)} \times \\ &\quad \times r \cos \tau (1 + k \operatorname{tg}^2 \tau) \frac{\pi n}{30} = \\ &= \frac{C}{480 K n \cos \alpha a (H + a)} \times \\ &\quad \times r \cos \tau \pi n (1 + k \operatorname{tg}^2 \tau). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= 1872 \delta s \sigma_p a (H + a) + \Theta E \pi d^4 \times \\ &\quad \times \cos [\arctg(k \operatorname{tg} \tau)] \cos^2 \gamma K n \cos \alpha. \end{aligned}$$

Общая мощность, потребляемая измельчающим аппаратом на процесс резания толстостебельных культур, представляет собой сумму мощностей, расходуемых на холостой ход и на резание:

$N_{\text{об}} = N_{\text{xx}} + N_{\text{рез}}$,
где N_{xx} — потребляемая энергия холостого хода, кВт, которая в свою очередь равна

$$N_{\text{xx}} = \frac{m_d g R_e \pi n}{30 \eta_p^2 \eta_b},$$

где m_d — масса диска с находящимися на нем деталями, т; $g = 9,82$ — ускорение свободного падения, м/с²; R_e — радиус шейки вала измельчителя под диск, м; $\mu_p = 0,995$ — потери на трение в опорах вала [8]; $\mu_b = 0,7$ — КПД вариатора [9].

В статье сделана попытка приблизиться к выводу универсальной формулы мощности измельчения резанием толстостебельных культур, которая учитывает основные конструктивные и кинематические параметры измельчителя.

Проведенные экспериментальные испытания измельчителя толстостебельных культур ротационно-дискового типа выявили, что резание ножами с прямым лезвием менее энергоемко по сравнению с другими ножами. Экономический эффект, приходящийся на один нож, в сфере производства и эксплуатации ножа с прямым лезвием по отношению к ножу с радиусным лезвием при резании кукурузы и подсолнечника составляет 90,72 руб., при резании клена — 123,12 руб. Экономический эффект, приходящийся на срок службы ножей [10] с прямым и радиусным лезвием, в сфере производства и эксплуатации ножа с прямым лезвием по отношению к ножу с насечкой при резании кукурузы составляет 211,68 руб, подсолнечника — 298,08 руб., клена — 384,48 руб. (в ценах ноября 2010 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Будашов, И.А.** Ротационно-дисковый измельчитель толстостебельных культур: энергоемкость эксплуатации [Текст] / И.А. Будашов / Рубцовский индустриальный институт // Новые материалы и технологии в машиностроении: Сб. тезисов всероссийской научно-технической конференции 23–24 ноября 2006 г.— Рубцовск, 2006.— 128 с.
2. **Резник Н.Е.** Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов [Текст] / Н.Е. Резник.— М.: Машиностроение, 1975.— 311 с.
3. **Беляев, Н.М.** Сопротивление материалов [Текст] / Н.М. Беляев.— М.: Главная редакция физ.-мат. лит-ры изд-ва «Наука», 1976.— С. 608.
4. **Ясенецкий, В.А.** Машины для измельчения кормов [Текст] / В.А. Ясенецкий, П.В. Гончаренко / Под ред. акад. ВАСХНИЛ Л.В. Погорелого.— Киев: Техника, 1990.— 166 с.
5. **Босой, Е.С.** Сопротивление стеблей резанию. Конструирование и производство сельхозма-
- шин [Текст] / Е.С. Босой // Труды РИСХМа.— Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского-на-Дону университета, 1964.
6. **Проценко, Г.И.** Расчет измельчающих аппаратов [Текст]: лекции / Г.И. Проценко.— Ростов н/Д: РИСХМ, 1987.— 57 с.
7. **Алешкин, В.Р.** Механизация животноводства [Текст] / В.Р. Алешкин, П.М. Рошин.— М.: Агропромиздат, 1985.— 336 с.
8. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин. В четырех томах [Текст] / Под ред. М.И. Клецкина.— Изд. 2-е, перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1967.— Т. 1.— 722 с.
9. **Пронин, Б.А.** Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы) [Текст] / Б.А. Пронин, А.Г. Ревков.— Изд. 2-е, перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1967.— 404 с.
10. **ГОСТ 23729–88.** Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки специализированных машин.

УДК 531.8:621.01

А.А. Хростыцкий, А.Н. Евграфов, В.А. Терёшин

ГЕОМЕТРИЯ И КИНЕМАТИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ШЕСТИЗВЕННИКА С ИЗБЫТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

При исследовании механизмов с избыточными связями рассматриваются два вида механизмов, в которых такие связи — следствия фи-

зических ограничителей движения в кинематических парах (КП), а также особой структуры механизма и определенных количественных со-



отношений его параметров [1, с. 32]. Назовем эти два случая механизмами первого и второго типа.

К первому типу можно, например, отнести все плоские механизмы, в которых действует плоская система сил. В плоском механизме избыточные связи, не позволяющие звеньям механизма выйти из плоскости и образующие статически неопределенную систему, можно исключить из рассмотрения, и при этом количество подвижностей механизма не изменится.

К второму типу относятся так называемые «парадоксальные» механизмы [1, с. 222], которые за счет своей особой структуры способны двигаться при избыточных закреплениях, причем в этом случае избыточные (зависимые) связи как физические ограничители не проявляют себя. В то же время при изменении параметров кинематической схемы механизма присутствующие в нем избыточные связи могут сделать движение невозможным. Иначе говоря, «парадоксальный» механизм второго типа постоянно находится в особом положении. Примерами таких механизмов являются: механизм параллелограмма с дополнительным центральным звеном — шатуном; четырехшарнирный пространственный механизм Беннетта; шестизвездочный пространственный механизм Брикара [3, с. 40–44]; пространственный механизм с двумя вращательными и двумя поступательными парами Ф.М. Диментберга и И.В. Иословича; четырехзвенный механизм Х. Верле с одной вращательной и тремя цилиндрическими парами [1, с. 202–203]. К механизмам второго типа относится и рассматриваемый в статье пространственный шестизвездочный механизм, осуществляющий технологический процесс со сложным движением рабочего органа (рис. 1).

В работах [3, с. 45, 217; 6, с. 145–147; 7, с. 142–145], рассматриваются некоторые особенности конструкции пространственного шестизвездочного механизма, но подробного исследования его работы не приводится. У А.Г. Овакимова [4] была частично исследована геометрия механизма с целью нахождения соотношений размеров звеньев. В.К. Петухов [5] посвятил отдельную статью определению количества избыточных связей методом Л.Н. Решетова [6, с. 33–36].

Предлагаемая статья посвящена анализу структуры пространственного шестизвездочника, его геометрии и кинематики.

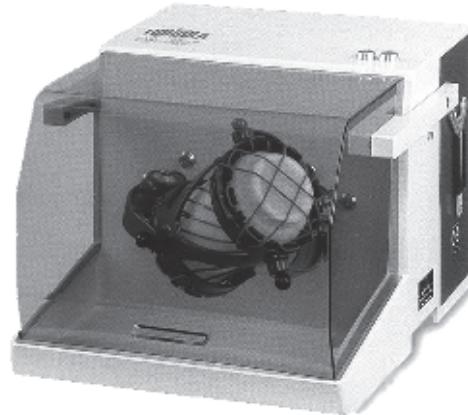


Рис. 1. Турбулентный смеситель на основе механизма пространственного шестизвездника

Структура механизма

Рассмотрим замкнутый пространственный шестизвездник, содержащий пять подвижных звеньев и шесть вращательных кинематических пар *V*-класса (рис. 2).

Оси *A* и *F* механизма параллельны друг другу, оси *A* и *B*, *B* и *C*, *C* и *D*, *D* и *E*, *E* и *F* — соответственно перпендикулярны друг другу. Благодаря такому расположению КП, рабочий орган (звено 3) во время работы совершает сложное пространственно движение: вращается вокруг своей оси *CD*, которая в свою очередь перемещается в пространстве с переменной угловой скоростью, совершая «покачивающееся» движение.

Для исследования структуры механизма необходимо определить количество его степеней подвижности *W* по формуле Сомова — Малышева (без учета зависимых связей)

$$W = 6N - \sum_{s=1}^{s=5} (6-s)p_s, \quad (1)$$

где *N* — число подвижных звеньев; *p_s* — число *s*-подвижных КП. Тогда из (1) имеем

$$W = 6 \cdot 5 - (6-1) \cdot 6 = 0$$

Видно, что число степеней подвижности механизма равно нулю, и механизм при этом не может двигаться. Однако из опыта известно, что в действительности механизм работает, т. е. *W* = 1. Следовательно, в рассматриваемом механизме имеется избыточная связь, а кинематическая цепь является статически неопределенной фермой.

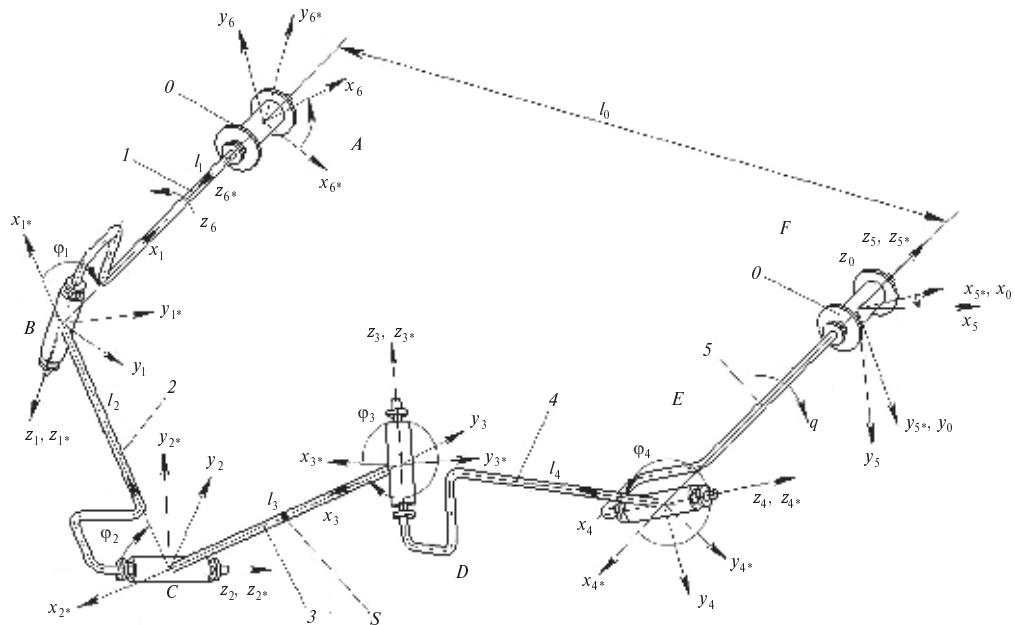


Рис. 2. Кинематическая схема механизма

Для кинематического расчета следует избавляться от избыточных связей. Разобьем механизм на структурные группы (рис. 3) и попробуем выявить избыточные связи на уровне полученных групп. Разомкнем кинематическую пару *E* и изобразим кинематическую схему в виде «дерева» [2, с. 44].

Первая структурная группа — входное звено с вращательной кинематической парой *F* и углом поворота *q*. Число степеней подвижности для нее $W=1$. Оставшиеся четыре подвижных звена, содержащие пять шарниров, образуют вторую структурную группу. Для нее число степеней подвижности, определяемое формулой (1), равно

$$W = 6 \cdot 4 - (6 - 1) \cdot 5 = -1$$

Отрицательное число означает наличие избыточной связи из-за конструктивных особенностей механизма, заключающихся в том, что рассматриваемая кинематическая цепь очень «чувствительна» к изменению соотношения своих геометрических параметров. Последнее равенство позволяет указать местоположение избыточной связи лишь с точностью до элементов кинематической цепи, для которой оно применено. Такой механизм формально является структурной группой, постоянно находящейся в особом положении.

В работе [4] показано, что если оси вращения входного *5* и выходного *1* звеньев параллельны, а все остальные оси взаимно перпендикулярны, то при равных расстояниях между осями промежуточных шарниров $l_2 = l_3 = l_4 = l$ и расстоянии между осями стоечных шарниров, равном $l_0 = l\sqrt{3}$, осевое смещение в любой одной

струctурной группе, постоянное во времени, не влияет на положение звеньев механизма. Важно, что это свойство сохраняется и в случае, если звено *5* вращается не вокруг горизонтальной оси, а вокруг оси, наклоненной под углом *q* к горизонту.



Рис. 3. Структурные группы



цилиндрической паре равно нулю. В этом случае цилиндрическая пара заменяется цилиндрическим шарниром, а неустранимая избыточная связь не влияет на кинематику механизма.

Геометрическое исследование

Решение прямой задачи геометрического анализа заключается в определении функций Π_s положения характерных точек механизма в зависимости от обобщенной координаты q путем решения уравнений для замкнутого векторного контура $BCDEF$:

$$x_s = \Pi_s(q); \quad y_s = \Pi_s(q); \quad z_s = \Pi_s(q),$$

где x_s, y_s, z_s — координаты произвольных точек в абсолютной системе.

Для составления уравнений на кинематической схеме (см. рис. 2) введены следующие обозначения: q — угол поворота входного звена 5; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ — углы относительного поворота звеньев; l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 — длины подвижных звеньев механизма; l_0 — расстояние между параллельными осями A и F ; S — центр звена 3; x_i, y_i, z_i — оси ортогональной системы координат, где индекс i указывает на номер звена, с которым эта система связана. В каждой системе координат ось z_i направлена по оси шарнира, т. е. начало координатной системы располагается в центре шарнира; ось x_i направлена по соответствующему звену, а ось y_i образует с осями x_i и z_i правую тройку. Системы координат x_i^*, y_i^*, z_i^* связаны с начальными положениями соответствующих звеньев. Система координат x_0, y_0, z_0 — неподвижная, связанная со стойкой.

Исходя из кинематической схемы (см. рис. 2) составляем матрицы перехода для всех соседних систем координат контура $BCDEF$. Матрица перехода от $(i-1)$ -й системы координат к i -й системе, совершающей вращательное движение относительно нее, определяется выражением

$$H_{i,i-1} = \begin{pmatrix} A_{i,i-1} P_z(q) & r_{0(i-1)}^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $A_{i,i-1}$ — матрица направляющих косинусов; $P_z(q)$ — матрица поворота; $r_{0(i-1)}^{(i)}$ — столбец координат центра O_{i-1} в системе O_i . Запишем все матрицы перехода.

Матрица перехода во вращательной паре F :

$$H_{05}(q) = \begin{pmatrix} A_{05*} P_z(q) & r_{F5}^{(0)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cos q & -\sin q & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \hline 1 \end{array} \right.$$

Матрица перехода от 5-й системы координат к 4-й:

$$H_{54} = \begin{pmatrix} A_{54*} P_z(\varphi_4) & r_{E4}^{(5)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & \cos \varphi_4 & -\sin \varphi_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \sin \varphi_4 & \cos \varphi_4 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ -l_5 \\ \hline 1 \end{array} \right.$$

Матрица перехода от 4-й системы координат к 3-й:

$$H_{43} = \begin{pmatrix} A_{43*} P_z(\varphi_3) & r_{03}^{(4)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cos \varphi_3 & -\sin \varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left| \begin{array}{c} l_4 \\ 0 \\ 0 \\ \hline 1 \end{array} \right.$$

Матрица перехода от 3-й системы координат ко 2-й:

$$H_{32} = \begin{pmatrix} A_{32*} P_z(\varphi_2) & r_{02}^{(3)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left| \begin{array}{c} l_3 \\ 0 \\ 0 \\ \hline 1 \end{array} \right.$$

Матрица перехода от 2-й системы координат к 1-й:

$$H_{21} = \left(\begin{array}{ccc|c} A_{21} * P_z(\varphi_1) & r_{01}^{(2)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) =$$

$$= \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \left| \begin{array}{c} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right. =$$

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \left| \begin{array}{c} 1 \end{array} \right.$$

Разомкнем векторный контур $BCDEF$ в точке B . Положение этой точки в пространстве относительно неподвижной системы координат определяется последовательным произведением всех матриц перехода, входящих в контур. Запишем это произведение в виде уравнения

$$H_{05} H_{54} H_{43} H_{32} R_B^{(2)} = R_B^{(0)}, \quad (3)$$

$$\text{где } R_B^{(2)} = \begin{pmatrix} BC \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, R_B^{(0)} = \begin{pmatrix} -BF \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sqrt{l_1^2 + l_0^2} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} -$$

расширенные столбцы координат точки B в неподвижной системе отсчета ($R_B^{(0)}$) и в системе отсчета, связанной со вторым звеном ($R_B^{(2)}$).

Перемножая полученные матрицы и выражая искомые зависимости функций положения Π_s в неявном виде, получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} -l_2 [\cos \varphi_2 (\sin \varphi_3 \cos q + \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \sin q) - \\ \quad - \cos \varphi_4 \sin \varphi_2 \sin q] - \\ -l_3 (\sin \varphi_3 \cos q + \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \sin q) - \\ \quad - l_4 \sin \varphi_4 \sin q = -\sqrt{l_1^2 + l_0^2}; \\ l_2 [\cos \varphi_2 (\sin \varphi_3 \sin q - \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \cos q) + \\ \quad + \cos \varphi_4 \sin \varphi_2 \cos q] + \\ + l_3 (\sin \varphi_3 \sin q - \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \cos q) - \\ \quad - l_4 \sin \varphi_4 \cos q = 0; \\ -l_5 - l_2 (\sin \varphi_2 \sin \varphi_4 + \cos \varphi_2 \cos \varphi_3 \cos \varphi_4) - \\ \quad - l_4 \cos \varphi_4 - l_3 \cos \varphi_3 \cos \varphi_4 = 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Полученная система уравнений решается численным методом с помощью программ в системах Mathcad и Microsoft Excel. Результатами вычислений являются графики зависимостей углов относительного поворота звеньев $\varphi_2(q); \varphi_3(q); \varphi_4(q)$ от обобщенной координаты q (рис. 4, а).

Из решения системы уравнений (4) можно найти координаты любой точки механизма в абсолютной системе координат. Для этого необходимо составить произведение соответствующих рассматриваемому контуру матриц перехода $H_{i,i-1}$ и в полученные уравнения подставить известные значения углов относительного поворота звеньев.

Для определения положения точки S в пространстве рассмотрим векторный контур $DEFS$, разомкнутый в точке S . В этом случае уравнение (3) будет иметь вид

$$H_{05} H_{54} H_{43} R_S^{(3)} = R_S^{(0)}. \quad (5)$$

Проведя соответствующие вычисления, получим систему уравнений для координат центра S :

$$\left\{ \begin{array}{l} -0,5l_3 (\sin \varphi_3 \cos q + \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \sin q) \\ \quad - l_4 \sin \varphi_4 \sin q = x_S^{(0)}; \\ 0,5l_3 (\sin \varphi_3 \sin q - \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \cos q) - \\ \quad - l_4 \sin \varphi_4 \cos q = y_S^{(0)}; \\ -0,5l_3 \cos \varphi_3 \cos \varphi_4 - l_4 \cos \varphi_4 - l_5 = z_S^{(0)}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Решая указанным выше численным методом систему уравнений, получим значения координат, по которым строится объемная траектория точки S в пространстве (см. рис. 4, б). Видно, что центр исполнительного звена S описывает в пространстве кривую, напоминающую собой «восьмерку». Такой характер кривой свидетельствует о сложном движении рабочего органа машины.

Кинематическое исследование

Задача кинематического исследования пространственного механизма с избыточной связью решается путем дифференцирования систем уравнений (1), полученных после вычисления произведения матриц перехода исследуемого контура.

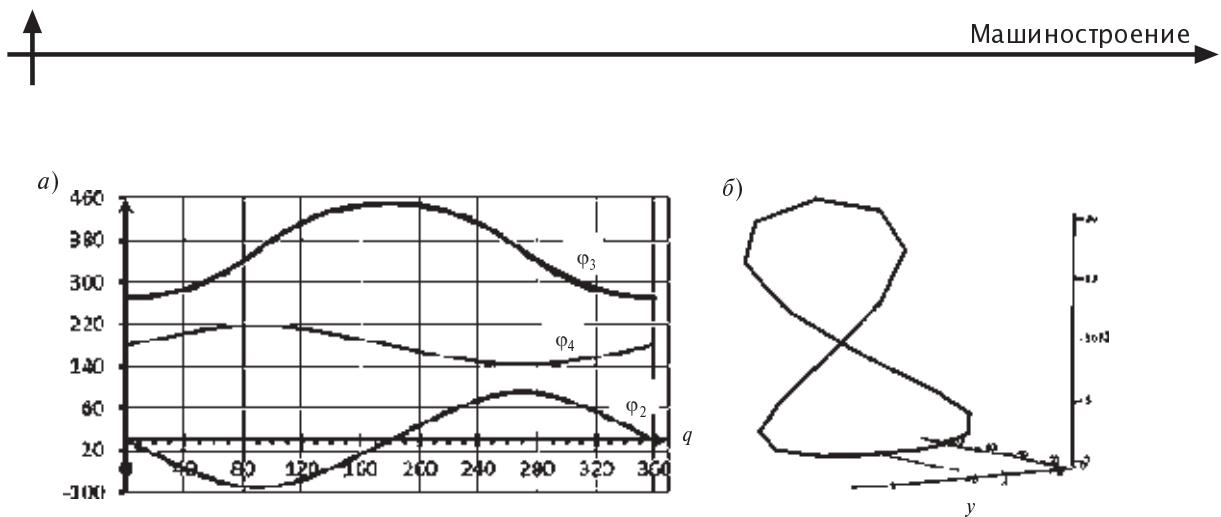


Рис. 4. Графики зависимостей углов относительного поворота звеньев от обобщенной координаты (а) и траектории точки S (б)

Рассмотрим векторный контур $BCDEF$. Найдем аналоги угловых скоростей $\frac{d\varphi_2}{dq}$, $\frac{d\varphi_3}{dq}$, $\frac{d\varphi_4}{dq}$ соответственно в кинематических парах C, D, E .

Продифференцируем по обобщенной координате q систему (4) для замкнутого векторного контура $BCDEF$. После преобразований получим три уравнения системы.

1-е уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_2}{dq} & [\sin \varphi_2 (\sin \varphi_3 \cos q + \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \sin q) + \\ & + \cos(\varphi_2) \cos(\varphi_4) \sin(q) - \\ & - \frac{d\varphi_3}{dq} [\cos \varphi_3 \cos q \cos \varphi_2 - \sin \varphi_3 \sin \varphi_4 \sin q \cos \varphi_2 + \\ & + \cos \varphi_3 \cos q - \sin \varphi_3 \sin \varphi_4 \sin q] - \\ & - \frac{d\varphi_4}{dq} [\cos \varphi_3 \cos \varphi_4 \sin q \cos \varphi_2 + \\ & + \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 \sin q - \\ & - \cos \varphi_3 \cos \varphi_4 \sin q + \cos \varphi_4 \sin q] = \\ & = \cos \varphi_4 \sin \varphi_2 \cos q + \sin \varphi_3 \sin q \cos \varphi_2 - \\ & - \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \cos q \cos \varphi_2 + \sin \varphi_3 \sin q + \\ & + \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \cos q - \sin \varphi_4 \cos q. \end{aligned}$$

2-е уравнение:

$$\begin{aligned} -\frac{d\varphi_2}{dq} & [\sin \varphi_2 (\sin \varphi_3 \sin q - \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \cos q) - \\ & - \cos \varphi_2 \cos \varphi_4 \cos q] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{d\varphi_3}{dq} [\cos \varphi_3 \sin q + \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \sin q + \\ & + \sin \varphi_3 \sin \varphi_4 \cos q + \cos \varphi_3 \sin q \cos \varphi_2 + \\ & + \sin \varphi_3 \sin \varphi_4 \cos q \cos \varphi_2] - \\ & - \frac{d\varphi_4}{dq} [\cos \varphi_3 \cos \varphi_4 \cos q + \\ & + \cos \varphi_3 \cos \varphi_4 \cos q \cos \varphi_2 + \\ & + \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 \cos q + \cos \varphi_4 \cos q] = \\ & = \sin \varphi_3 \cos q - \cos \varphi_4 \sin \varphi_2 \sin q + \\ & + \sin \varphi_3 \cos q \cos \varphi_2 + \\ & + \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 \sin q \cos \varphi_2 + \sin \varphi_4 \sin q. \end{aligned}$$

3-е уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_2}{dq} & (\cos \varphi_3 \cos \varphi_4 \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2 \sin \varphi_4) + \\ & + \frac{d\varphi_3}{dq} (\cos \varphi_2 \cos \varphi_4 \sin \varphi_3 + \cos \varphi_4 \sin \varphi_3) + \\ & + \frac{d\varphi_4}{dq} (\cos \varphi_2 \cos \varphi_3 \sin \varphi_4 - \\ & - (\cos \varphi_4 \sin \varphi_2 + \sin \varphi_4 + \cos \varphi_3 \sin \varphi_4)) = 0. \end{aligned}$$

Решая эту систему уравнений в численном виде, получим графики зависимостей аналогов угловых скоростей от координаты q (рис. 5, а).

Определим аналоги угловых ускорений

$\frac{d^2\varphi_2}{dq^2}$, $\frac{d^2\varphi_3}{dq^2}$, $\frac{d^2\varphi_4}{dq^2}$ в кинематических парах C, D, E соответственно. Продифференцировав вто-

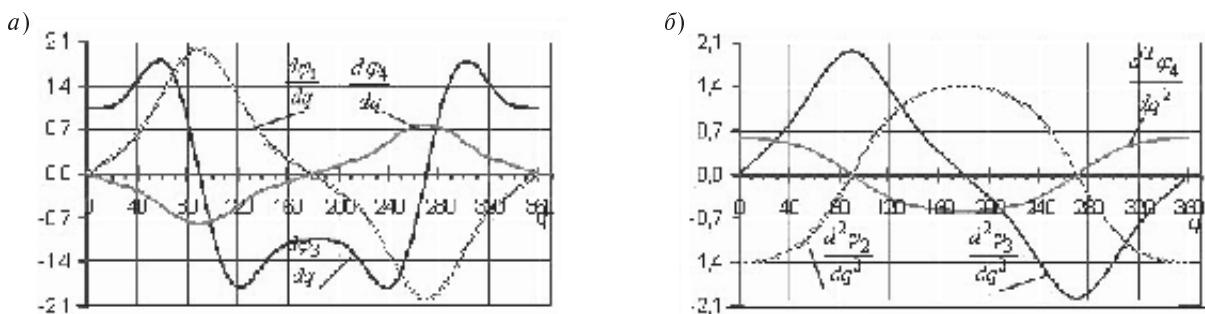


Рис. 5. Графики зависимостей аналогов угловых скоростей (*a*) и аналогов угловых ускорений (*b*) от обобщенной координаты *q*

рой раз по обобщенной координате систему уравнений (1), решим численно полученные уравнения.

По результатам решения построены графики зависимостей аналогов угловых ускорений от

координаты q (см. рис. 5, б), что для исследуемого механизма проведено впервые. Результаты указанного решения могут быть использованы для дальнейшего динамического исследования пространственного шестизвездника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Диментберг, Ф.М.** Теория пространственных шарнирных механизмов [Текст] / Ф.М. Диментберг.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.— 336 с.
 2. **Коловский, М.З.** Теория механизмов и машин [Текст]: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.З. Коловский, А.Н. Евграфов, Ю.А. Семенов, А.В. Слоущ.— 3-е изд., испр.— М.: Издательский центр «Академия», 2008.— 560 с.
 3. **Мудров, П.Г.** Пространственные механизмы с вращательными парами [Текст] / П.Г. Мудров.— Казань: Изд-во Казан. университета, 1976.— 264 с.
 4. **Овакимов, А.Г.** Анализ пассивной связи пространственного шестизвездного механизма с вращательными парами [Текст] / А.Г. Овакимов // Известия вузов СССР.— М.: Машиностроение.— 1970.— № 2.— С. 58–61.
 5. **Петухов, В.К.** О структуре одного пространственного механизма [Текст] / В.К. Петухов // Труды казахского филиала семинара по ТММ.— Алма-Ата, 1974.— № 1.— С. 64–69.
 6. **Решетов, Л.Н.** Конструирование рациональных механизмов [Текст] / Л.Н. Решетов.— М.: Машиностроение, 1972.— 256 с.
 7. **Решетов, Л.Н.** Самоустанавливающиеся механизмы [Текст] / Л.Н. Решетов.— М.: Машиностроение, 1979.— 336 с.

УДК 635.1:628.93

Н.К. Гаприндашвили, А.Г. Семенов

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ИСКУССТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Проблема выращивания фруктов, овощей и других растительных культур (биологические объекты) в условиях искусственного климата характерна для России, значительная часть оби-

таемой территории которой расположена за полярным кругом — при низких температурах и с полугодичными циклами дня и ночи. Поэтому для городов и весей Крайнего Севера и север-



ной полосы России в целом задача производства сельскохозяйственной продукции «встает в полный рост».

Применение в теплицах искусственного освещения давно стало догмой и достаточно широко распространенным, хоть и относительно дорогим средством интенсификации роста растений и других биологических объектов. Важны не только общее количество световой энергии, достигающей растения, и спектральный состав света, но и взаимное соотношение периодов освещения и отсутствия света, или дня и ночи — так называемый фотопериодизм.

В отличие от растений «длинного дня», у растений «короткого дня» время освещения не должно превышать определенный уровень во избежание нарушения цветения. Кроме того, существуют некоторые виды нейтральных растений, например розы (рис. 1), у которых соотношение времени дня и ночи не влияет на цветение, но от света зависят скорость роста, высота и т. д. Поэтому необходимо обращать внимание не только на характеристики тепличных светильников, но и устанавливать индивидуальный программируемый график включения/отключения освещения в теплице [1].

Применение привычного для нашего растениеводства тепличного хозяйства в природных условиях со скучной солнечной энергией мало-

эффективно и, как правило, убыточно. Соответственно на повестку дня выдвигается задача совершенствования технологий и оборудования теплиц и тепличных комплексов с искусственным микроклиматом на основе, прежде всего — физического моделирования солнечного излучения.

Разумеется, здесь речь идет о «грубом» воспроизведении спектра солнечного излучения (в отличие, например, от создания «искусственного Солнца» для нужд космических исследований и наземной отработки изделий космической техники в термобарокамерах) — об использовании тепловой и световой энергии искусственных источников (ламп) со спектром излучения, достаточно близким (в разумном понимании) к солнечному. Это, безусловно, вопрос экономический. Но здесь же большой комплекс технических проблем для целого спектра областей науки и инжиниринга: механики, электротехники, теплотехники, химии и т. д.

В качестве базовых тепличных комплексов (аналоги с оригинальными и полезными для дальнейших инноваций техническими решениями) можно принять, например, три интересные отечественные разработки, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения. Дадим краткую их характеристику.

Аналог 1. «Телескопическая теплица» (авт.). Одноэтажный вегетационный домик вы-



Рис. 1. Современное цветоводческое тепличное хозяйство с искусственным освещением [1]

полнен из нескольких секций. С целью сокращения площади, занимаемой им в нерабочем положении, секции заполнены разновеликими по поперечному сечению и убирающимися одна в другую («лежачие матрешки» — *авт.*). Внутренние секции снабжены колесным ходом и направляющими (рельсы). Предусмотрены электромеханические приводы. Используется солнечное излучение (в разложенном состоянии теплицы) Основное назначение теплицы — научные исследования в области растениеводства (вегетационные опыты) [2].

Аналог 2. «Симбиоз тепличных культур» (*авт.*). Одноэтажная теплица включает помещение и устройство для создания в нем газовоздушной среды. С целью повышения урожайности и создания искусственного микроклимата без затрат энергии внешних источников помещение

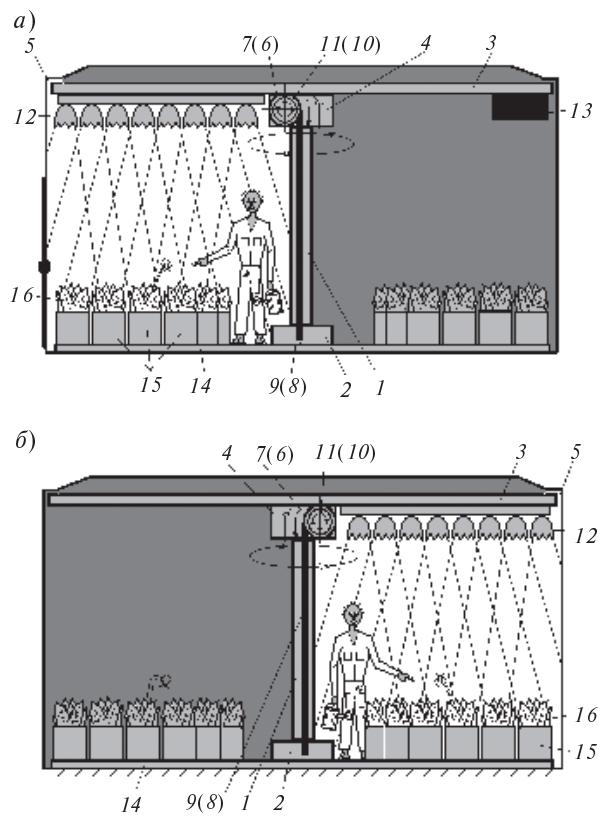


Рис. 2. Схема теплицы
с искусственным микроклиматом
по варианту «день — ночь»

на основе врачающегося секторного блока ламп с подвижной (синхронное вращение, подъем, опускание) перегородкой-экраном, вид сбоку:

- а — слева «день», справа — «ночь»;
- б — слева «ночь», справа — «день»

разделено светонепроницаемой перегородкой с управляемыми клапанами на два отсека, один из которых выполнен со светопрозрачным покрытием и предназначен для растений, выделяющих кислород, а другой — со светонепроницаемым покрытием — предназначен для выращивания растений, выделяющих углекислый газ. Отсеки соединены каналами с атмосферой. Назначение — производство сельскохозяйственной продукции [3].

Аналог 3. «Убежище» (*авт.*). Двухэтажная (один этаж — подземный) теплица оснащена рабочими помещениями для поливки и подкормки растений. С целью выращивания растений ночью и в зимнее время к ночи и к зиме растения в ящиках перемещают из верхнего помещения в нижнее при помощи механизированного горизонтального цепного конвейера, проходящего через рабочие помещения, расположенные в торцах теплицы и предназначенные также для перемещения грунта и урожая [4].

Результаты инициативных исследований в рамках межфакультетских НИРС (участвуют кафедра теоретических основ инновации факультета инновации и кафедра колесных и гусеничных машин энергомашиностроительного факультета) позволили авторам данной статьи выдвинуть следующие инновационные предложения, включающие в себя, в частности, несколько технических решений (варианты технологий и устройств для их осуществления), объединенных единым изобретательским замыслом и по предварительной оценке являющихся потенциальными объектами промышленной собственности (рис. 2—4).

Основные положения этих предложений прошли предварительную апробацию: были доложены на XXXVII Неделе науки СПбГПУ в декабре 2010 года [5, 6], а также представлены на конкурс работ (проектов) студентов и аспирантов СПбГПУ по номинации «Научные результаты, обладающие конкретными перспективами внедрения» и отмечены призовыми местами.

По первому варианту (см. рис. 2, 3) в центре круглой одноэтажной теплицы установлена стойка 1 на под пятнике (упорный подшипник) 2, на которой смонтирован зонтичный поворотный навес 3 с приводом 4 его вращения (электрический, электромеханический или ручной). Навес 3 образует с цилиндрическими стенками теплицы небольшой светоизолирующий зазор 5. Сни-

зу на навесе 3 диаметрально установлены пара одинаковых барабанов 6 и 7 с выдвижными светонепроницаемыми шторами 8 и 9, (подвижная перегородка-экран). Для подъема и опускания штор 8, 9, предпочтительно независимых друг от друга, предусмотрены их приводы 10 и 11. С одной стороны, от штор 8 и 9 на полукруге, также снизу, на навесе 3 установлено множество электрических источников света 12 со спектром, достаточно приближенным к солнечному (благоприятным для растительных культур или иных биологических объектов, для выращивания которых и предназначена теплица). Как правило, это натриевые лампы высокого давления — *Hortus, Flora, Green и Agro* и др. типы [1]. Подвод электроэнергии, предпочтительно (по правилам техники безопасности и правилам устройства электроустановок) пониженного напряжения к источникам 12 обеспечен низкооборотным вращающимся контактным устройством (ВКУ), которое встроено в стойку 1. На свободном от источников 12 полукруге навеса 3 установлен противовес 13. Последний может быть пространственно и конструктивно совмещен с другим оборудованием, например поливочным, противопожарным и т. д. На неподвижном полу 14 теплицы устанавливают ящики 15 с выращиваемой культурой 16, причем секторально, с проходами для работников и радиальными нишами для обеспечения возможности опускания штор 8, 9 до пола 14 во временных промежутках между пошаговым поворотом навеса 3.

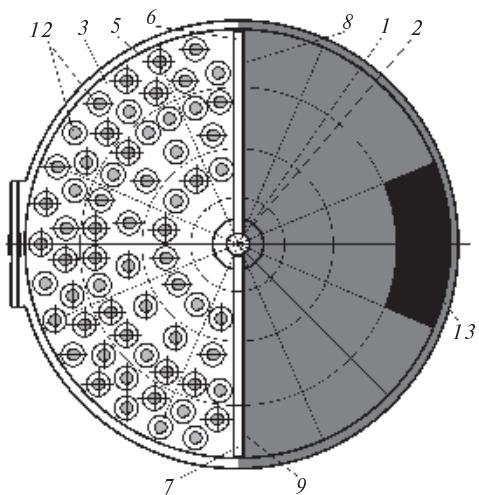


Рис. 3. Схема теплицы по варианту «день — ночь», вид в плане

Работа устройства и, соответственно, суть новой технологии имитации солнечного освещения очевидны из иллюстраций: при опущенных светонепроницаемых шторах 8 и 9 и любом угле поворота навеса 3 одна условно «вращающаяся» половина внутреннего пространства теплицы будет освещена источниками 12, а другая — затемнена, что дает возможность имитировать вращение Солнца относительно неподвижной культуры 16, т. е. суточный характер освещения (день, ночь).

Устройство и работа другого варианта теплицы (рис. 4) и, соответственно, суть другой новой технологии имитации солнечного освещения

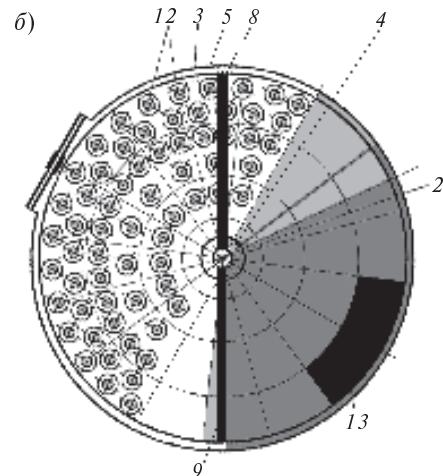
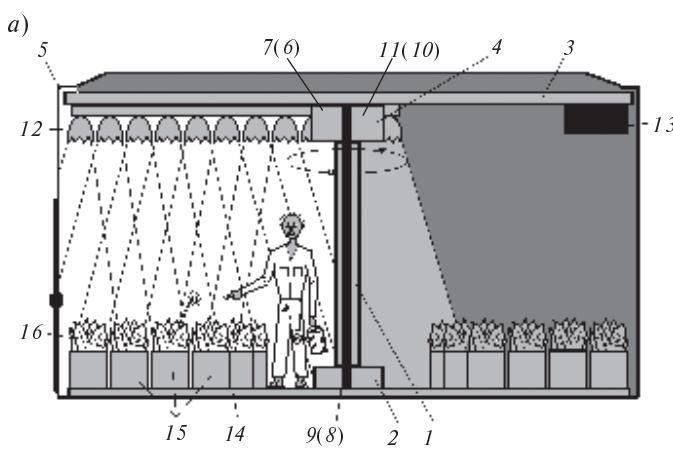


Рис. 4. Схема теплицы по варианту «день — ночь»
на основе вращающегося секторного блока ламп над неподвижной перегородкой-экраном:
а — вид сбоку; б — вид в плане

характеризуются неподвижностью перегородки-экрана 7, 8 и возможностью имитации более естественной циклограммы суточного освещения: при равномерном или равномерно-ступенчатом вращении навеса 3 относительно неподвижной перегородки-экрана 9, 8, культура 16 будет освещаться сперва возрастающим, а затем убывающим количеством источников 12. Образно говоря, «восход лампового светила 3 из-за перегородки 9(8) и его закат за перегородку 9, 8» представляет возможность имитации естественного относительного вращения Солнца относительно неподвижной культуры 16, т. е. суточного характера освещения (ночь, утро, день и вечер).

При этом у всех вариантов имеются широкие возможности работы оборудования по раз-

личным программам (циклограммы, включающие продолжительность времен суток), в том числе с элементами автоматизации.

Очевидно, такая теплица, как теплотехнический комплекс с электромеханическим оборудованием, существенно отличается от трех описанных выше аналогов, хотя и использует лучшие их технико-экономические качества. Следует отметить и наличие энергетической экономии. Затраты на создание теплиц нового поколения объективно необходимы, но «лучше не экономить на оборудовании» [1].

Планируются дальнейшие прикладные НИР по рассмотренной теме и конструкторско-технологическая проработка проекта с перспективой дальнейшей коммерциализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Освещение теплиц: светильники для растений [Электрон. ресурс] // <http://www.magazine-svet.ru/review/33101/>.

2. Авт. свид. СССР № 357928, МПК A01G 9/02. Теплица. / А.А. Жученко и др.; Молдавский НИИ орошающего земледелия и овощеводства.— Приор. 12.05.1971.— Бюл. 1972. № 34.

3. Авт. свид. СССР № 950241, МПК A01G 9/24. Теплица с искусственным микроклиматом. / В.И. Носачев и др.; Центральная экспериментально-исследовательская конструкторско-технологическая лаборатория химизации сельского хозяйства.— Приор. 16.03.1981.— Бюл. 1982. № 30.

4. Авт. свид. СССР № 123366, МПК A01G 9/02. Теплица [Текст] / И.И. Гаврилов.— Приор. 05.09.1958.— Бюл. 1959. № 20.

5. Гаприндашвили, Н.К. Инновационное предложение по светотеплотехническому оборудованию для выращивания биологических объектов в искусственном микроклимате [Текст] / Н.К. Гаприндашвили, А.Г. Семенов // Материалы Международной межвуз. науч.-техн. конференции студентов и аспирантов «XXXVIX Неделя науки СПбГПУ», 02 –09 дек. 2010 г. Ч.II.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010.— С. 70–72.

6. Гаприндашвили, Н.К. Новые технологии и оборудование (варианты) для выращивания биологических объектов в искусственном микроклимате [Текст] / Н.К. Гаприндашвили, А.Г. Семенов // XXXIX международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ»: материалы докладов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, С. 191–193.



МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.762

А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев, В.Н. Кокорин

НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Основной тенденцией современного машиностроения является существенное повышение уровня физико-механических и эксплуатационных свойств изделий сложной формы, что обеспечивает увеличение ресурса работоспособности машин и механизмов и минимизацию затрат при их эксплуатации. Наиболее значительные результаты достижений последних лет в области современного материаловедения связаны с созданием искусственных гетерофазных материалов и с наноструктурированием традиционных материалов (композитные материалы с металлическими матрицами отличаются повышенной жаропрочностью и длительной прочностью, хорошими магнитными, электрическими и демпфирующими свойствами).

Известно, что пластическая деформация не только упрочняет металл, но и способствует изменению структуры. Однако увеличение прочности металлических материалов обычно приводит к снижению их пластичности. Достижение высокой прочности и пластичности, необходимых для создания новых перспективных конструкционных и функциональных материалов, — одна из фундаментальных проблем материаловедения. Применительно к ультрамелкозернистым металлам и сплавам эта проблема может быть решена за счет управления их микроструктурой, которая характеризуется не только наличием ультрамелких зерен/субзерен, но и их формой и распределением, особой структурой границ, плотностью дислокаций и другими параметрами [1].

Объемные материалы с наноструктурой независимо от способа получения имеют повышенный уровень прочности, при этом пластичность нанокристаллических металлов и сплавов, как

правило, мала и составляет 0,5–4 % [2], что существенно ограничивает деформационные способности наноструктур и, как следствие, технологические возможности при изготовлении изделий сложной пространственной формы.

Для расширения спектра формообразования объемных наноматериалов, реализации возможностей нанотехнологий и повышения потребительских свойств изделий необходимо изыскивать принципиально новые производственные процессы, материалы и устройства. При этом должны быть решены следующие задачи:

разработка технологии получения дисперсных частиц наноразмерного диапазона;

разработка технологии введения наночастиц в соответствующую матрицу с последующим объемным формообразованием.

В работе [3] отмечается, что практически все методы синтеза наноразмерного наполнителя приводят к получению структур, характеризующихся неравновесным метастабильным состоянием. Это создает значительные трудности введения и равномерного распределения химически активного в матрице основного материала.

Технологическим ограничением использования материалаnanoуровня является отсутствие эффективных схем компактирования наночастиц в компактный материал, которые бы не допускали исчезновения их фазовых границ. Обеспечение этого условия позволит получить нанопродукт, физико-механические свойства которого будут на порядок превосходить свойства идентичного по химическому составу материала традиционных технологий при получении изделий сложной пространственной формы [3].

Представляет научный и производственный интерес рассмотрение процессов деформирова-

ния структуронеоднородных пористых материалов типа «фильтр» с использованием заполняющей нанофазы при обеспечении соответствующих температурно-скоростных режимов нагружения, присущих процессам деформирования в состоянии сверхпластичности.

Сравнивая реологические модели сверхпластичного материала и идеальных реологических сред — идеально пластичного твердого тела и линейно вязкой жидкости, можно корректно принять физическую модель, в которой сверхпластичный материал относится к классу сложных вязкопластичных сред. При этом матрица металла-основы в процессе пластического формообразования увлекает (транспортирует) заполняющую нанофазу, не деформируя ее и тем самым исключая упрочнение дисперсных частиц. Приведенное выше условие позволит регламентировать завершающую операцию компактирования наночастиц в монолитный металл, исключая исчезновение их фазовых границ.

Формирование подобной структуры, определяющей уровень механических свойств металлов и сплавов, существенно зависит от режимов обработки, в первую очередь от величин и характера приложенного давления, степени деформации, температурно-скоростных режимов нагружения.

Состояние сверхпластичности можно определить совокупностью признаков [4], в числе которых:

повышенная чувствительность напряжения текучести σ_s к изменению скорости деформации,

$$m = \frac{\partial\sigma/\sigma}{\partial\xi/\xi} \geq 0, 3;$$

крайне незначительная величина деформационного упрочнения

$$n = \frac{\partial\sigma/\sigma}{\partial\xi/\xi} \geq 0 - 0,1.$$

аномально высокий ресурс деформационной способности;

напряжение текучести σ_s материала в состоянии сверхпластичности в несколько раз меньше предела текучести, характеризующего пластическое состояние данного материала.

Признаки свойств пластичности, проявляющихся в определенных условиях:

структурное состояние деформированного металла;

температура;
скорость деформации.

По структурному признаку различаются две разновидности сверхпластичности:

1) сверхпластичность, проявляющаяся у металлов с особо мелким зерном ($d \leq 10$ мкм). Зависимость эффекта сверхпластичности от исходного размера зерен (чем меньше зерно, тем больше склонность материала к скоростному упрочнению, соответственно больше его деформационная способность и меньше погрешность течения). При этом необходимо, чтобы зерна имели равноосную форму, а также обладали в процессе нагрева до температуры деформирования и при последующем деформировании устойчивостью против роста;

2) сверхпластичность полиморфных металлов, проявляющаяся при деформировании их в процессе фазовых превращений.

Следует отметить, что проявление эффекта сверхпластичности наиболее характерно для полиморфных металлов и сплавов (например, α - и γ -железо и др.). Эффект сверхпластичности материалов заключается в аномально больших характеристиках деформируемых металлов (относительное удлинение $\alpha \geq 1000\%$) и малых величинах сопротивления деформированию. В настоящее время это явление изучается достаточно интенсивно, деформирование в состоянии сверхпластичности получает промышленное применение при производстве объемных деталей и оболочек из труднодеформируемых малопластичных материалов (использование компактированных наноструктур в качестве исходных заготовок для последующего деформирования неэффективно, так как эти структуры имеют низкие характеристики пластичности; причем формируемые структуры после интенсивной пластической деформации (ИПД) по схемам многоциклового равноканального углового прессования (МРКУП) характеризуются вытянутыми вдоль направления деформирования зернами с определенным коэффициентом неравноосности, что препятствует выполнению условия возникновения сверхпластичности, для которой необходимо наличие исходной структуры, имеющей зерна равноосной формы [5]).

Создание наноструктурированных металломатричных механических смесей (НММС) за счет использования эффекта сверхпластичности невозможно без выяснения закономерностей



изменения структуры в процессе интенсивной деформации. Однако на момент постановки данного проекта эти вопросы не исследованы должным образом. Реализация новых возможностей и развитие методов интенсивного пластического деформирования НММС с повышенными механическими свойствами весьма актуальны как в научном, так и в прикладном значениях.

Предложена технология получения сложнопрофильных изделий из наноматериалов с использованием эффекта сверхпластичности. Суть предлагаемых решений заключается в следующем: применяется механическая смесь тонкодисперсных порошковых полиморфных материалов крупностью 1–10 мкм; в состоянии свободной засыпки по технологиям порошковой металлургии идет спекание полученной смеси (металломатричная основа), в результате образуется пористое изделие типа «фильтр». Затем производится внедрение субмелкого наноматериала (10^{-4} – 10^{-6} мкм)

в пористую матрицу в виде пасты или в сухом виде с использованием мундштучного прессования или пневмовдувания. При этом создаваемая структура будет включать: а) ячеистую (заполняемую) мозаику металла с размером зерна 1–10 мкм; б) заполняющую нанофазу с размером частиц 10^{-4} – 10^{-6} мкм.

При регламентируемых температурно-скоростных условиях деформирования данная механическая металломатричная структура позволит обеспечить транспортирование металла наноуровня в поровые полости металломатрицы за счет реализации интенсивного пластического деформирования по схемам обработки металлов давлением с использованием эффекта сверхпластичности. Механизм деформирования при использовании эффекта сверхпластичности реализуется путем вакансационной и дислокационной ползучести, а также межкристаллитной деформации.

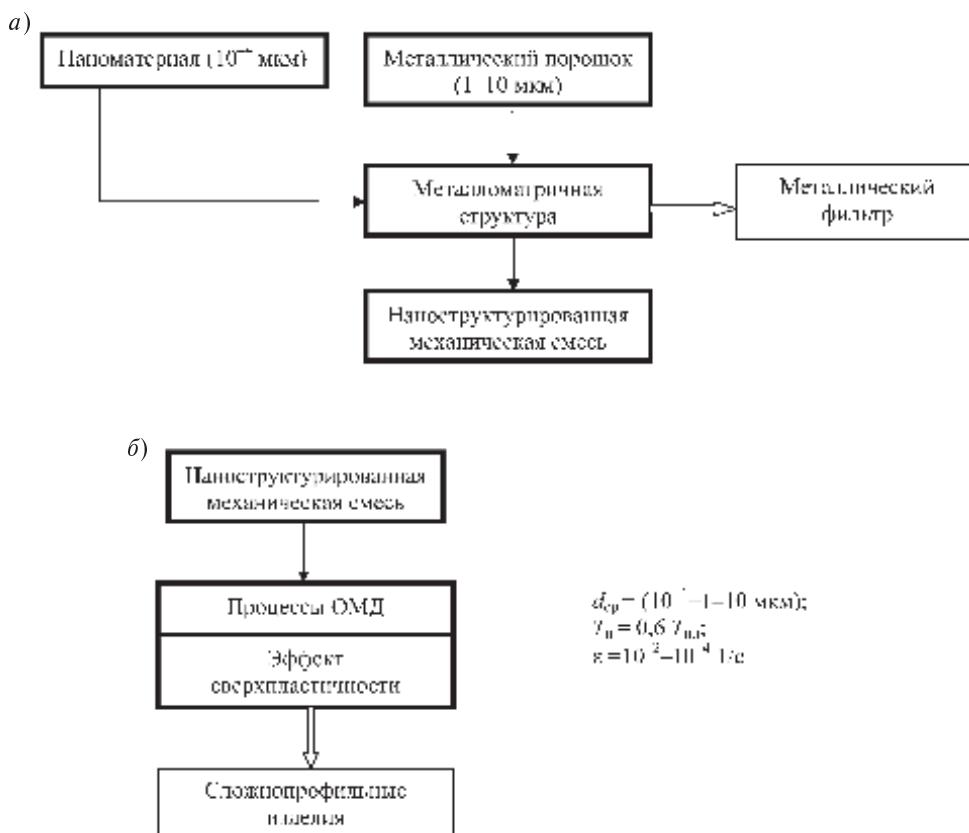


Рис. 1. Технология применения эффекта сверхпластичности при НММС в процессах изготовления сложнопрофильных изделий:

- а* — наноструктурирование металломатричных механических смесей;
б — использование эффекта сверхпластичности материала



Сопоставление указанных преимуществ и ограничений, а также обобщение имеющегося опыта использования эффекта сверхпластичности в процессах штамповки позволяют выделить ряд технологических задач, при решении которых наибольший эффект обеспечивает деформирование данных структур в состоянии сверхпластичности, в их числе:

штамповка изделий особо сложной формы (тонкостенные детали сложной формы с оребрением), получение которых недоступно для традиционных методов обработки давлением, при обеспечении значительного улучшения ряда показателей качества готовой продукции (размерная точность и чистота поверхности, отсутствие коробления в процессе термообработки и существенных изменений структуры и, как следствие, практически полное отсутствие внутренних напряжений в изделиях);

получение высококачественных штампованных заготовок и деталей, имеющих высокий уровень изотропности структуры и физико-механических свойств.

Наиболее устойчивый результат дает практическое использование состояния сверхпластичности в процессах обработки давлением, в частности в технологиях объемной штамповки с использованием схем крип-штамповки на гидравлических прессах (при получении оребренных точных поковок сложной формы), и термического расширения инструмента на термоупругих прессах.

Принципиальная структурная схема предложенного технологического процесса наноструктурирования материалов при изготовлении сложнопрофильных изделий с использованием эффекта сверхпластичности представлена на блок-схеме (см. рис. 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев, Р.З. Структура и механическое поведение ультрамелкозернистых металлов и сплавов, подвергнутых интенсивной пластической деформации / Р.З. Валиев, Р.К. Исламгалиев // Физика металлов и металловедение.— 1998. Т. 85,— № 5. С. 161–177.

2. Сироткин, О.С. Моделирование структуры и свойств металлических и неметаллических материалов в рамках парадигмы их многоуровневой организации [Текст] / О.С. Сироткин // Прогрессивные технологии обработки материалов: Научные труды Всеросс. совещания материаловедов России / Под ред. В.Н. Кокорина.— Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006.— С. 7–9.

3. Волков, Г.М. Классификационные критерии

нанотехнологии материалов [Текст] / Г.М. Волков // Прогрессивные технологии обработки материалов: Научные труды Всероссийского совещания материаловедов России / Под ред. В.Н. Кокорина.— Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006.— С. 10–14.

4. Шоршоров, М.Х. Применение эффекта сверхпластичности при деформировании компактных и полученных порошковой металлургией быстрорежущих сталей [Текст] / М.Х. Шоршоров, Т.А. Чернышова, А.С. Базык [и др.] // XIII Pulvermet. Tagung.— Dresden.— 1985.— S. 267–276.

5. Новые процессы деформации металлов и сплавов: Учеб. пособие для вузов / А.П. Коликов, П.И. Полухин, А.В. Крупин [и др.]— М.: Высш. шк., 1986.— 351 с.

УДК 539.621:537.226.86

Ю.Г. Барабаницков, С.Г. Чулкин

АНИЗОТРОПИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ КЕРАМИЧЕСКОЙ МАССЫ ПРИ ТРЕНИИ

При испытании керамической массы установлен эффект анизотропии электрической проводимости при трении. Способность граничных слоев на жирных кислотах, являющихся диэлек-

триками, выпрямлять переменный ток была открыта Фивегом [1]. В отношении влажных минеральных порошков, обладающих ионной проводимостью, сведений о выпрямляющем



эффекте не обнаружено. Электропроводность подобных дисперсных систем (ДС) в процессе трения зависит от направления тока, снижаясь при отрицательном потенциале на скользящем электроде и возрастаая при обратной полярности. Электропроводность зависит также от скорости скольжения. Эффект асимметричной проводимости исчезает при остановке движения и возникает вновь при возобновлении скольжения.

Ячейка измерения электропроводности показана на рис. 1. Медный электрод A в виде диска приводится во вращательное движение и скользит по поверхности ДС. Электрод сравнения K , выполненный из того же металла, что и электрод A , и равный ему по размерам, находится в неподвижном контакте с ДС. Дисперсная система состоит из тонкого минерального порошка (диэлектрик) и воды (проводник II рода). Промежуточные электроды a, b, c, d, e из медной проволоки диаметром 1 мм вводятся в пасту на глубину порядка 1 мм. Положение промежуточных электродов характеризуется относительной величиной x/L , где x — координата, L — длина образца. Электрический потенциал среднего электрода c принят за ноль.

В исходном положении основные электроды A и K одинаковой площади прижимаются к ДС регулируемой силой. На них возникают электрические потенциалы (соответственно ψ_a и ψ_k) которые при неподвижных электродах в состоянии установившегося равновесия примерно равны ($\psi_a = \psi_k$). Это наблюдается, когда нормальное давление на контакте превышает предел текучести системы и фактическая площадь контакта становится равной площади электрода. Промежуточные электроды имеют иные условия контакта с дисперсной системой, и поэтому их электрический потенциал менее отри-

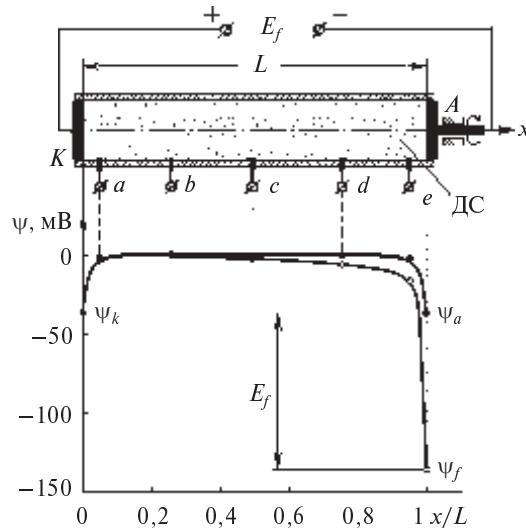


Рис. 1. Схема измерительной ячейки и распределение электрических потенциалов в покое и при трении

цательный, чем ψ_a и ψ_k . Возникновение отрицательного заряда в металле при статическом контакте с водным раствором вызывается, как известно, электродными процессами — анодной реакцией ионизации металла с переходом катионов в раствор.

При вращении электрода A вокруг своей оси и возникновении скольжения относительно поверхности ДС его потенциал ψ_a смещается в отрицательную сторону и принимает значение ψ_f . Потенциал ψ_k электрода K остается без изменения. Разность потенциалов $E_f = \psi_a - \psi_f$ является электродвигущей силой (трибо-ЭДС), под действием которой возможно протекание тока во внешней цепи.

В табл. 1 приведены результаты испытания керамической массы (КМ) с влажностью $W = 17,5\%$ при силе прижима электродов $N = 90$ Н.

Таблица 1

Электростатический потенциал на медных электродах при контакте с КМ

Показатели	Значения показателей для различных электродов					
	Электрод K	Неподвижные электроды				
		a	b	c	d	e
Относительное положение x/L	0	0,05	0,25	0,50	0,75	0,95
Потенциал электродов в покое, мВ	-29,6	12,4	26,1	0	11,1	22,2
То же при трении электрода A в течение 1 мин., мВ	-29,0	11,0	23,9	0	6	-15,6
То же в течение 4 мин., мВ	-29,2	10,8	19,8	0	0,8	-13,2
						-184

Потенциал скользящего электрода в результате трения по керамической массе в течение 1 минуты снизился со значения $\psi_s = 31,5$ мВ до значения $\psi_f = -129$ мВ ($I = 0$). Поскольку потенциал ψ_k неподвижного электрода K практически не зависит от потенциала на электроде A , то трибо-ЭДС можно определить как разность потенциалов на электродах K и A : $E_f = \psi_k - \psi_f$. Тогда значения E_f будут положительными. Примем потенциал ψ_k за ноль; тогда $E_f = -\psi_f$.

В опытах по трению было замечено, что после остановки движения электрода A происходит кратковременный скачкообразный рост E_f до некоторого значения, а затем спад до нуля. Скачок трибо-ЭДС может быть обусловлен несколькими причинами, например уменьшением площади контакта ДС с контртелом в момент остановки или скачкообразным падением силы тока в результате резкого снижения электропроводности ячейки. Последнее обстоятельство представляется наиболее вероятным. В работе [2] было установлено, что электропроводности керамической массы при скольжении электрода и в покое различаются. Для этого в опытах по определению трибо-ЭДС измерялась сила тока при коротком замыкании внешней цепи I_{k3} , что позволило рассчитать электропроводность ячейки как отношение I_{k3}/E_f .

Зависимости трибо-ЭДС и удельной электропроводности КМ от скорости скольжения v , представленные в работе [2], показывают, что E_f возрастает с увеличением v . При этом ток короткого замыкания I_{k3} растет не пропорционально ЭДС, а несколько быстрее. Таким образом, электропроводность керамической массы возрастает с увеличением скорости скольжения электрода. Эти результаты согласуются с представлениями Леба [3] о том, что электризация достаточно интенсивна в случае высокого электрического сопротивления жидкости (10^9 – 10^{10} Ом·см). При низком сопротивлении происходит обратная утечка, и значительное разделение зарядов невозможно. Таким образом, скачок трибо-ЭДС после остановки трения может быть вызван резким сокращением обратной утечки зарядов в результате падения проводимости керамической массы.

Электрическое сопротивление КМ постоянному току. Для оценки влияния трения на характер прохождения через ДС постоянного тока от внешнего источника была проведена серия опытов по

определению зависимости силы тока и разности потенциалов от скорости скольжения, времени процесса трения, полярности приложенного напряжения, металла электродов, влажности керамической массы. Напряженность электрического поля, создаваемого в образце, не превышала 1,5 В/см. Это позволило свести к минимуму влияние электроосмоса.

В опытах, результаты которых показаны на рис. 2, *a*, *b*, испытывалась керамическая масса влажностью 14,3 % при трении по стали 12Х18Н10Т и постоянной нормальной силе 166 Н (82 кПа). До подачи напряжения производилась «обкатка» образца в течение 1 минуты. Нуль отсчета по шкале времени соответствует моменту включения внешнего источника тока в процессе скольжения. Знаком «+» или «-» отмечена полярность контртела (скользящего электрода).

При подаче постоянного напряжения в первый момент (точка 1) происходит резкий скачок тока до некоторого наибольшего при данных условиях абсолютного значения $|I_{max}|$, после чего ток быстро падает, и уже приблизительно через 10–30 секунд устанавливается практически неизменное значение $|I_c|$. Поведение тока аналогично тому, как это происходит при зарядке конденсатора. В случае конденсатора величина I_c называется током утечки. В нашем случае величину I_c целесообразнее назвать током проводимости. При первичном подключении скользящего электрода к положительному полюсу источника тока (рис. 2, *a*) начальный скачок тока $|I_{max}|$ по абсолютной величине оказывается меньше, а ток проводимости $|I_c|$ больше, чем в случае противоположной полярности напряжения (рис. 2, *b*). Последующее переключение полярности с «+» на «-» приводит к новому скачку тока (точка 2), амплитуда которого по абсолютной величине примерно в два раза выше начального скачка, что можно объяснить перезарядкой двойного электрического слоя (ДЭС), т. е. компенсацией существующих зарядов и установлением новых, противоположного знака. При перемене знака контртела с «-» на «+» значение $|I_{max}|$ примерно того же порядка, что и в первый момент опыта. Из приведенных графиков видно, что независимо от последовательности переключения полярности абсолютное значение тока проводимости всегда больше при положительном, чем при отрицательном потенциале скользящего электрода, и, следовательно электропро-

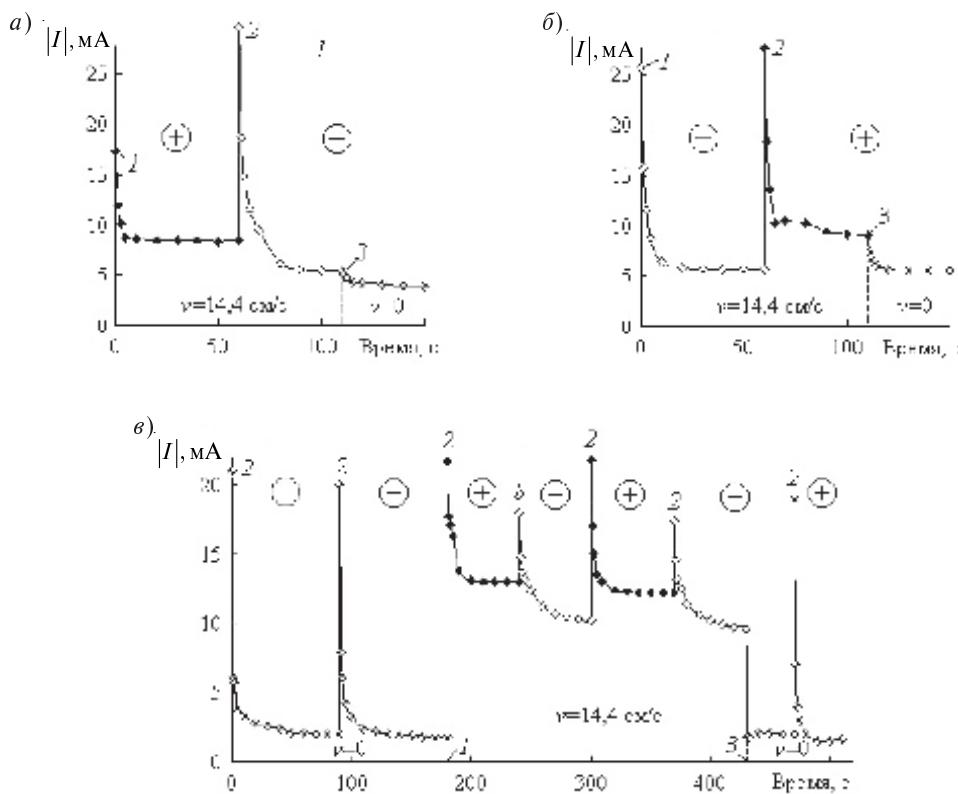


Рис. 2. Изменение силы тока через образец при перемене полярности источника питания в покое и при трении керамической массы влажностью 14,3 % по контрателу из стали 12Х18Н10Т (а, б), а также влажностью 16,6 % по контрателу из латуни Л68 (в); точка 1 — момент включения напряжения 3 В (а, б) и 1 В (в); точка 2 — момент перемены полярности напряжения; точка 3 — момент остановки скольжения

водность КМ при трении зависит от направления тока. Если, не выключая напряжения, остановить скольжение (точка 3), то ток проводимости падает (по абсолютной величине), однако его значение зависит от того, при какой полярности была произведена остановка. Это можно объяснить остаточной поляризацией электродов.

Если многократная перезарядка производится на неподвижной относительно контратела инколумитарной (не подвергавшейся трению) поверхности КМ, то положительные и отрицательные циклы практически совпадают по абсолютной величине (рис. 2, в, с), т. е. процесс является обратимым. Скольжение электрода по КМ (участок *ac*) приводит к смещению положительных циклов по отношению к отрицательным. При этом абсолютные значения как I_{\max} , так и I_c , при положительной полярности контратела оказываются выше, чем при отрицательной. Из рис. 2, в, с также видно, что независимо

от направления тока включение процесса скольжения привело к существенному росту абсолютных значений I_c . Это указывает на увеличение проводящей способности трибоячейки. При остановке движения (точка 3) электропроводность падает, и снижается абсолютная величина тока проводимости. Удельное электрическое сопротивление КМ, вычисленное по значениям тока проводимости при скольжении и в покое, при различной влажности КМ дано в табл. 2 (для контратела из латуни Л68 и из стали 12Х18Н10Т).

Сопоставляя данные табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1. Имеется некоторое промежуточное значение влажности, при котором КМ обладает наибольшей электропроводностью. Как уменьшение, так и увеличение влажности КМ против этого значения приводят к росту сопротивления постоянному току. Этот результат полностью со-

Таблица 2

**Удельное электрическое сопротивление
трибоячеки постоянному току**

Влажность КМ, %	Удельное сопротивление ρ , Ом·м			Напряжение U , В	
	При скольжении скоростью 14,4 см/с				
	На контакте «+»	На контакте «-»			
Электроды — латунь I68					
15,2	33,3	54,9	149,1		
16	29,3	37,1	94,3		
16,3	27,4	43,2	83,65		
16,6	18,9	30,5	88,3		
19,6	44,4	76,1	147,9		
21,3	66,8	125,2	195,5		
Электроды — сталь 12Х18Н10Т					
12,4	46,8	354,2	3422		
12,6	33,7	112,5	1089		
13,1	38,9	380,5	-		
14,3	33,15	55	68,7		
19,6	44,4	565,7	622,3		
21,3	69,1	953,9	1590		

гласуется с данными С. П. Ничипоренко [4], полученными для глуховецкого каолинита.

2. Независимо от влажности КМ и материала контртела удельное электрическое сопротивление с при скольжении меньше, чем в состоянии покоя. Особенно это заметно в случае стального контртела.

3. Независимо от влажности КМ и материала контртела при положительной полярности скользящего электрода ρ ниже, чем при отрицательной его полярности. Особенno значительные различия наблюдаются в случае стального контртела.

4. Электрическое сопротивление постоянному току зависит от материала электродов. В слу-

чае применения электродов из стали 12Х18Н10Т имеют место более высокие значения ρ , чем в случае латуни. Следует отметить, что влияние материала электродов на электропроводность системы проявляется наиболее сильно в состоянии покоя (отношение ρ стали к ρ латуни в среднем составляет $\rho_{ст}/\rho_{лат} = 10,7$). В меньшей степени это заметно при относительном движении тел и в случае отрицательной полярности контртела ($\rho_{ст}/\rho_{лат} = 6,6$). При положительной полярности скользящего электрода разница между контртелами из стали и латуни мало заметна ($\rho_{ст}/\rho_{лат} = 1,2$).

Анизотропия проводимости была обнаружена также при испытании других ДС: кварцевого песка, глинозема, воздушной извести, портландцемента.

Электрическое сопротивление ДС переменному току. В отличие от опытов с постоянным током, при переменном токе частотой 1000 Гц не было обнаружено влияния скорости скольжения на электрическое сопротивление трибоячеки (табл. 3).

Как видно из табл. 3, при различных скоростях скольжения, влажностях КМ, значениях нормального давления и материалах контртела значения удельного электрического сопротивления переменному току весьма близки между собой. Расхождения между средними можно считать случайными, что подтверждается критерием Стьюдента ($Q_{St} = 0,13$), а также правилом «трех сигма» ($\rho_{max} - \rho_{min} = 0,25 < 3\sigma = 0,38$). Фрагмент осциллограммы переменного тока, записанной на ленте светолучевого осциллографа при испытании КМ, влажностью 12,6 % (см. табл. 3), приведен на рис. 3. В состоянии покоя (при $v = 0$) синусоида расположена симметрично относительно оси абсцисс. При скольжении со скоростью 7,2 см/с в результате частичного выпрямления тока синусоида смещается вверх на величину

Таблица 3

Удельное сопротивление образца КМ переменному току, частотой 1000 Гц

Влажность КМ, %	Контртело	Нормальное давление F , кг/кв	Напряжение U , В	Удельное сопротивление ρ , Ом·м при скорости скольжения, см/с			
				0	7,2	14,4	Средн.
21,3	Латунь I68	57,3	0,5	7,094	7,100	7,088	7,094
21,3	Сталь 12Х18Н10Т	57,3	0,5	7,129	7,035	7,027	7,064
12,6	Сталь 12Х18Н10Т	82,1	0,275	6,700	6,786	7,047	6,844
			Среднее	6,974	6,974	7,054	7,001

появившейся постоянной составляющей $I_p = 0,61$ мА. При последующем двукратном увеличении скорости (до 14,4 см/с) постоянная составляющая тока возросла всего на 0,05 мА.

Таким образом, при трении ВСС амплитуда положительной полуволны увеличивается, а отрицательной — уменьшается на одну и ту же величину I_p так, что среднее значение амплитуды остается неизменным. Поэтому сопротивление переменному току в среднем не зависит от скорости скольжения.

Различия в электропроводности системы при постоянном и переменном токе связаны с тем, что в первом случае использовались значения тока проводимости, а во втором — амплитудные значения тока. Действительно, если сопоставить пикиевые значения постоянного тока при перезарядке (точки 2 на рис. 2, в, с), то хорошо видно, что при трении положительные пики лежат выше, а отрицательные — ниже пикиевых значений в состоянии покоя. В среднем же по абсолютной величине получаются практически одинаковые пикиевые значения тока при скольжении и в покое.

Зависимость электропроводности системы от материала электродов при постоянном токе и отсутствие такой зависимости при переменном токе побудило к постановке дополнительных опытов, в которых при одинаковых условиях (в состоянии покоя) испытывались электроды из различных металлов. Измерительные ячейки, состоящие из одной и той же КМ влажностью 19,6 % и пары одинаковых плоских электродов в форме дисков, устраивались в корпусе медицинских одноразовых шприцов объемом 2 см³. На дно цилиндра укладывался один из электродов, затем корпус заполнялся КМ (до 1 см³), сверху помещался и прижимался поршнем второй электрод. Заполненные шприцы устанавливались в вертикальном положении в специальному приспособлении и на выступающий конец поршня каждого из них укладывался груз мас-

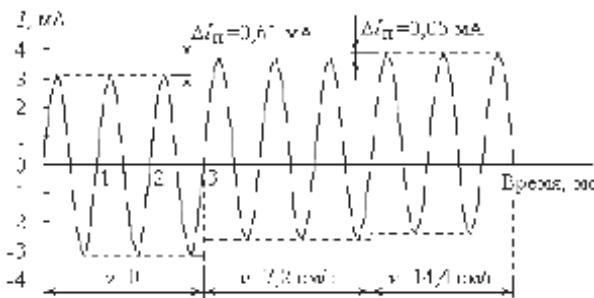


Рис. 3. Частичное выпрямление переменного тока частотой 1000 Гц при трении керамической массы влажностью 12,6 % по контргруту из стали 12Х18Н10Т ($U = 275$ мВ; $N = 166$ Н)

сой 2 кг. Токосъемные контакты вводились через отверстия, одно из которых предусмотрено под иглу, а другое было просверлено в донышке поршня в угловой выемке крестообразного штока. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что в случае переменного тока материал электрода практически не оказывает влияния на электропроводность ячейки. В случае постоянного тока влияние электродов проявляется в значительной степени. По всей вероятности, это влияние обусловлено различием электрохимических реакций на электродах. При постоянном токе электрическое сопротивление системы оказывается всегда более высоким, чем при переменном токе. Это, как уже указывалось, объясняется различием между пикиовым и остаточным значением тока.

Характер электрического поля в трибоячейке. Для того чтобы определить характер электрического поля, в образец КМ вводились вспомогательные электроды, обозначенные на рис. 1 буквами *a*, *b*, *c*, *d*, *e*. Напряжение от внешнего источника подводилось к основным электродам *A* и *K*. Потенциалы электродов определялись относительно неподвижного электрода *K*. Положение каждого электрода характеризуется отноше-

Таблица 4

**Удельное электрическое сопротивление трибоячейки
в зависимости от материала электродов**

Характеристика тока	Удельное сопротивление, Ом·м, при материале электрода							
	Cu	Zn	Ti	Al	Fe	Ni	железо	12Х18Н10Т
Переменный, 1 Гц, 1000 Гц	8,55	8,06	7,71	7,65	7,55	7,26	7,93	7,89
Постоянный, 1 Гц	25,2	17,1	93,1	43,0	11,6	51,3	67,0	98,8

нием расстояния x от электрода K к длине образца L . Расстояния между электродами a и K , а также e и A составляют около 1 мм. Результаты испытаний приведены на рис. 4.

При неподвижной системе (рис. 4, *a*) перемена полярности приложенного напряжения изменяет только знак потенциалов электродов. Их абсолютные значения остаются практически прежними. Таким образом, кривая распределения потенциала, не изменяя своей формы, располагается симметрично по ту или другую сторону оси абсцисс. На кривой можно выделить три участка — два резких скачка потенциала у поверхностей контакта КМ с основными электродами и пологий, почти горизонтальный участок между ними. По-видимому, скачки потенциала следует отнести к двойным электрическим слоям (ДЭС) на границах раздела КМ с электродами. Судя по величине падения потенциала, можно заключить, что основное сопротивление прохождению постоянного тока оказывают эти ДЭС, причем на границе пасты с неподвижным электродом падение потенциала в 2–2,5 раза выше, чем у скользящего электрода. Это обстоятельство можно объяснить различным давлением на соответствующих контактах, так как часть давления на нижний электрод «съедается» трением КМ по боковой поверхности корпуса трибоячейки. На долю самой КМ приходится очень малая часть (менее 1 %) общего электрического сопротивления трибоячейки R_a . Рассчитаем удельное сопротивление непосредственно КМ. Согласно кривой 2 на рис. 4 разность потенциалов $\Delta\psi_{ae}$ между электродами a и e составляет

6,0 мВ, а ток проводимости — 0,095 мА. В результате получаем электрическое сопротивление образца КМ, равное $R_{km} = 63,2 \Omega$, а удельное электрическое сопротивление $\rho_{km} = 7,09 \Omega \cdot \text{м}$.

Полученное нами кривым 1, 2 и 4 среднее значение $\rho_{km} = 7,87 \Omega \cdot \text{м}$ очень близко к значениям, получаемым на переменном токе (см. табл. 4). Отсюда, принимая также во внимание независимость ρ от материала электродов, можно заключить, что измерения на переменном токе дают значения электропроводности, совпадающие с теми, которые получаются на постоянном токе, если исключить сопротивление на контакте пасты с электродами. Тогда разность значений электрического сопротивления ячейки, полученных на постоянном и переменном токе, есть сопротивление граничных слоев на электродах.

В расчетах не использованы данные опыта, соответствующие кривой 3 на рис. 4. Действительно, эта кривая совершенно не похожа на кривую 1, так как, в отличие от последней, получена на движущейся относительно электрода A (с $x/L = 1$) пасте. Согласно кривой 1 градиент потенциала электрического поля имеет на всех участках одинаковое направление, в то время как один из участков кривой 3 (скакок потенциала на поверхности контакта КМ со скользящим электродом) имеет вектор напряженности, направленный противоположно полю от внешнего источника. Таким образом, внешнее электрическое поле не в состоянии изменить полярность ДЭС на скользящем электроде, между тем как перезарядка ДЭС на неподвижном электроде происходит очень легко. Можно предположить,

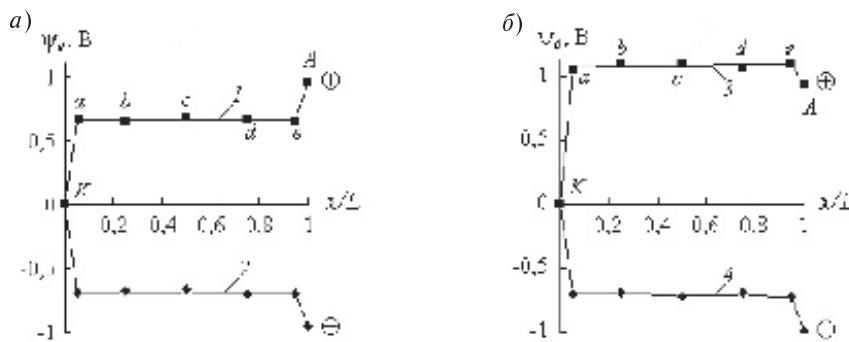


Рис. 4. Распределение электрического потенциала в образце керамической массы влажностью 12,5 %
в состоянии покоя и при скольжении со скоростью 14,4 см/с
по контртелу из стали 12Х18Н10Т ($N = 166$ Н); знаком «+» или «-»
отмечена полярность потенциала, приложенного
к скользящему электроду A



что устойчивость (неизменяемая полярность) ДЭС на электроде при его скольжении нарушает симметрию проводимости, так как в одном из направлений тока носители заряда перемещаются (в пределах ДЭС) по полю, а в другом — против поля, преодолевая потенциальный барьер.

Сумма двух скачков потенциала, определенных по кривым 1 и 3, между вспомогательным электродом e и скользящим электродом A составляет 438 мВ, что лежит между 487 и 325 мВ — средними значениями трибо-ЭДС, измеренными до и после опыта, представленного кривой 3 на рис. 4. Совпадает также полярность трибо-ЭДС с направлением изменения потенциала контроллера в результате трения.

Обнаружена анизотропия проводимости граничного слоя на скользящем электроде и устойчивость двойного электрического слоя, который не инвертируется напряжением противоположного знака, в отличие от ДЭС на неподвижном электроде. Направление такой односторонней проводимости совпадает с падением потенциала в ДЭС и соответствует отрицательному трибопотенциалу на скользящем электроде. Таким образом, облегчается анодная и затрудняется катодная реакция, что смещает равновесие и приводит к непрерывному растворению металла, пока существует процесс внешнего трения. Данное явление обусловливает изнашивание более твердого тела менее твердым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения [Текст]: монография / А.С.Ахматов.— М. : Физматгиз, 1963.— 472 с.
2. Барабанщиков, Ю.Г. Электрические явления при трении дисперсных систем. Ч.П. Односторонняя проводимость граничного слоя [Текст] / Ю.Г. Барабанщиков // Трение и износ.— 2004. Т. 25. № 3.— С. 266–270.
3. Леб, Л. Статическая электризация [Текст]: монография / Л. Леб.— М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.— 408 с.
4. Ничипоренко, С.П. Электропроводность коагуляционных структур дисперсий глинистых материалов [Текст] / С.П. Ничипоренко // Научные основы технологии и развития производства стеновой строительной керамики в Украинской ССР : материалы первой Украинской конференции / СОПС УССР АН УССР.— Киев, 1970.— С. 145–149.

УДК 621.762:541.1

А.И. Рудской, Н.Г. Колбасников, Д.А. Рингинен

ПОЛУЧЕНИЕ СУБМИКРОННОЙ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ ГОРЯЧЕЙ И ТЕПЛОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Измельчение структуры металлов при помощи пластической деформации — действенный способ повышения их механических и эксплуатационных свойств. Для получения субмикронной и нанокристаллической структуры металлов особенно эффективно использование методов интенсивной пластической деформации, к которым обычно относят равноканальное угловое прессование (РКУП), осадку с кручением на наковальне Бридгмена и так называемую многоосевую деформацию, для осуществления ко-

торой в лабораторных исследованиях применяют модуль MaxStrain термомеханического симулятора Gleeble [1–5]. Преимущество последнего метода связано с возможностью получения больших степеней деформации как при комнатной, так и при повышенных температурах, а его недостаток — неравномерность деформации по сечению образца, обусловленная появлением «ковочного креста» при деформации осадкой.

На рис. 1, *a* представлен вид рабочей камеры модуля MaxStrain комплекса Gleeble-3800,

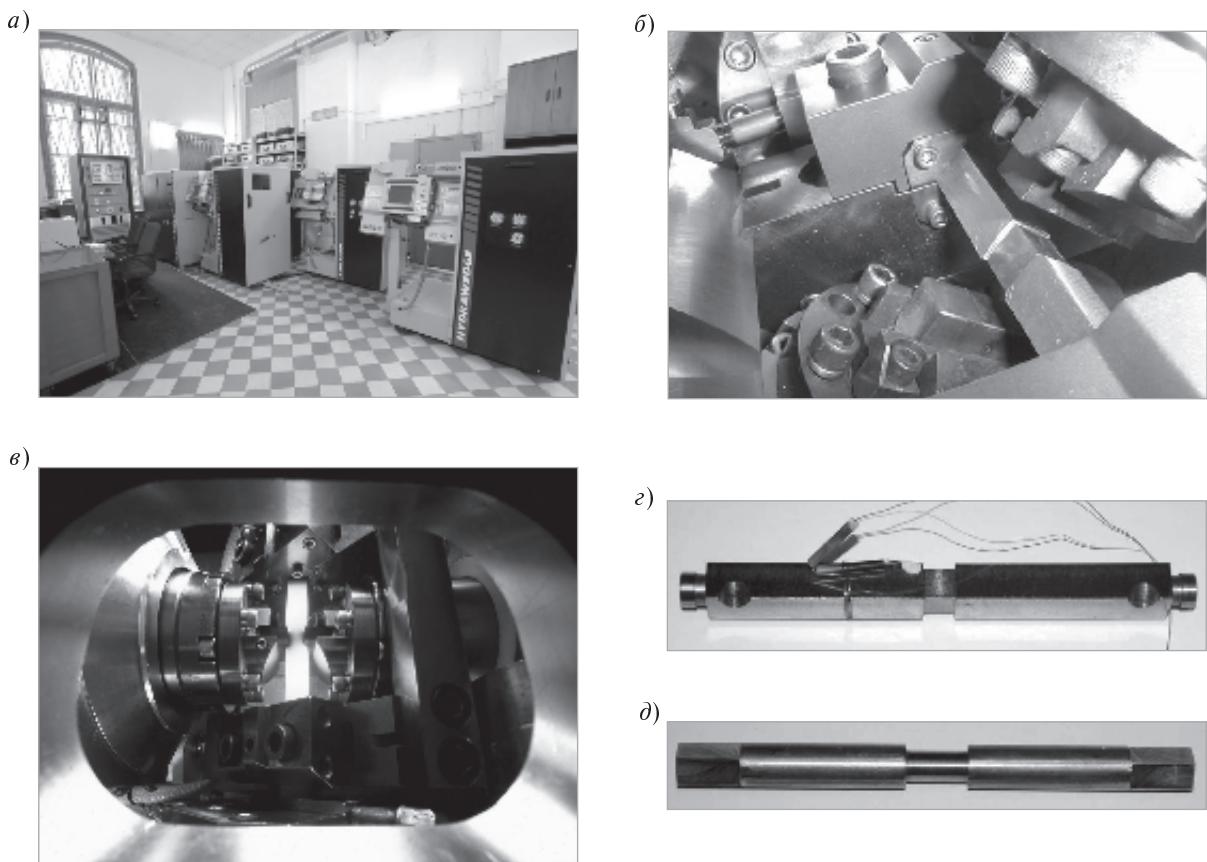


Рис. 1. Общий вид комплекса Gleeble-3800 (а), вид рабочей камеры модуля MaxStrain (б), модуль в работе (в), образцы для проведения обработки методами многоосевой деформации (г) и кручения (д)

установленного в Санкт-Петербургском политехническом университете, на рис. 1, б — момент выполнения горячей деформации при высокой температуре, а на рис. 1, в — вид образца для проведения исследований. Термопара для измерения и управления температурой рабочей части образца подводится к деформируемому участку образца через наклонное отверстие (см. рис. 1, в). Для ускоренного охлаждения с торцов образца просверлены отверстия, глубина которых не достигает рабочей части. Охлаждение происходит потоком сжатого воздуха или воды. Обработку металла можно проводить на воздухе, в атмосфере защитного газа или в вакууме. Нагрев образцов выполняется прямым пропусканием электрического тока через образец. Некоторые параметры деформирующего и нагревательного устройств модуля MaxStrain:

скорость нагрева образцов — до 15°C/c;
скорость перемещения бойков — до 500 мм/c;

угол поворота образца при проведении обработки — 90°;

минимальное время паузы между деформациями — 0,2 с;

возможное количество деформаций образца — не ограничено.

К особенностям пластической деформации на модуле MaxStrain относится незначительное изменение формы и площади сечения рабочей части образца после каждой пары ударов бойками. Например, после 250 ударов при суммарной логарифмической деформации $\varepsilon_{\Sigma} \approx 40$ сечение образцов изменялось от 10×10 до $6,5 \times 6,5$. Поскольку размеры образца в процессе обработки в малой степени, но изменяются, для подсчета величины деформации при известном перемещении бойков была разработана специальная компьютерная программа, учитывающая время деформации и зависимость силы деформирования от времени обработки. При проведении экспе-



риментов на модуле MaxStrain термомеханического симулятора Gleeble-3800 фиксируется множество параметров, в том числе силы, перемещения бойков, температура, потребляемая мощность, токи, время.

Исследовали формирование структуры и изменение механических свойств после больших пластических деформаций для следующих материалов: новые трубные микролегированные стали категорий прочности X90 и X100, нержавеющая сталь с высоким содержанием азота (до 0,4 %), титан BT1-0, титановый сплав ПТ-3В, алюминиевый сплав АМг-6. Механические свойства определяли при испытаниях на растяжение на образцах, изготовленных из обработанного на комплексе Gleeble металла, диаметр образцов 5 мм, длина рабочей части 18 мм. Для тестирования использовали разрывные машины Zwick/Roell, оснащенные измерителями продольной деформации (экстензометрами). Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе Carl Zeiss «Observer», сканирующем микроскопе SUPRA 55VP-25-78, оснащенном анализатором изображений структуры Thixomet, и просвечивающем микроскопе Philips. Микротвердость измеряли на микротвердомере фирмы Buehler.

Исследовали возможности получения субмикронной и нанокристаллической структуры различными методами, предусматривающими возможности измельчения размера зерна исходного аустенита в сталях за счет динамической рекристаллизации, упрочнение и фрагментацию аустенита перед началом фазовых превращений

и интенсивную пластическую деформацию при температурах фазовых превращений; величина суммарной логарифмической деформации достигала $\varepsilon_{\Sigma} = 40$.

Исследование возможности измельчения зерна трехстадийной деформацией в аустенитной области. Для исследования возможности измельчения размера зерна аустенита было решено использовать явление фрагментации аустенита при больших деформациях, чтобы ферритное превращение, приводящее к дальнейшему уменьшению размера зерна металла, происходило на фоне фрагментированной структуры. Для назначения режимов деформации дополнительно были выполнены исследования температуры преципитации карбонитридов микролегирующих элементов, выпадение которых обуславливает окончание рекристаллизации. Для этого в согласии с существующей методикой, изложенной, например, в [1], на крутильном модуле комплекса Gleeble-3800 был выполнен эксперимент, состоящий в многократной деформации образца при его непрерывном охлаждении. Образцы для испытаний представлены на рис. 1, в. Деформацию проводили через каждые 30 °C, непрерывно охлаждая металл со скоростью 1 °C/c, истинная деформация на каждом этапе кручения — 0,3. На рис. 2, а представлен график зависимости температуры испытаний, деформирующих напряжений от степени деформации, а на рис. 2, б зависимость предела текучести на каждом этапе деформации от величины, обратной температуре.

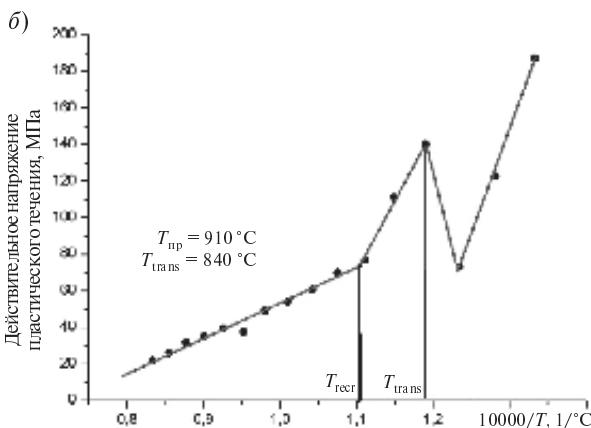
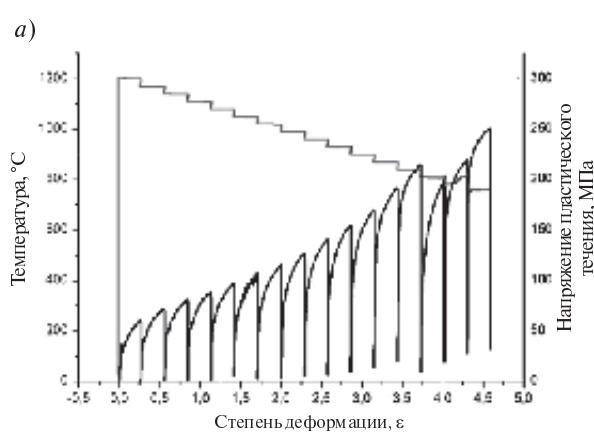


Рис. 2. Зависимости напряжения пластического течения σ (1) и температуры образцов (2) от степени деформации кручением ε (а) и предела текучести на каждом этапе деформации от величины, обратной температуре (б)

Построение зависимости деформирующих напряжений от величины, обратной температуре (рис. 2, б), т. е. $\sigma_t(1/T)$, позволяет в более явной форме выявить характерные точки изменения интенсивности упрочнения и температурной зависимости предела текучести. Например, при температуре 910–920 °С предел текучести начинает расти более интенсивно, что связывают обычно со значительным торможением рекристаллизации за счет выделения преципитатов карбонитридов микролегирующих элементов, в первую очередь ниобия и ванадия. Спад зависимости $\sigma_t(1/T)$ при $T = 840$ °С ассоциируют с началом ферритного превращения: накопленное после прекращения рекристаллизации деформационное упрочнение трансформируется в поверхностную энергию большого числа зародышей новой фазы. Таким образом, для микролегированных сталей реализуется еще один из механизмов измельчения зерна феррита.

Выбранный режим обработки стали (рис. 3, а), предназначенный для получения мелкого зерна аустенита, предусматривает

нагрев образца до температуры 1200 °С;

выдержку для растворения микролегирующих элементов;

многократную горячую деформацию выше температуры окончания рекристаллизации T_{nr} при обеспечении условий протекания динамической рекристаллизации;

ускоренное охлаждение в области температур $T_{nr} < T < T_{\Phi п}$, где $T_{\Phi п}$ — температура феррит-ного превращения;

деформацию аустенита при температурах $A_{3+}(20–40)$ °С с целью фрагментации и создания благоприятных условий для образования множества зародышей феррита на границах фрагментов;

выдержку в течение нескольких секунд для выделения феррита, образование которого активировано фрагментированной структурой аустенита;

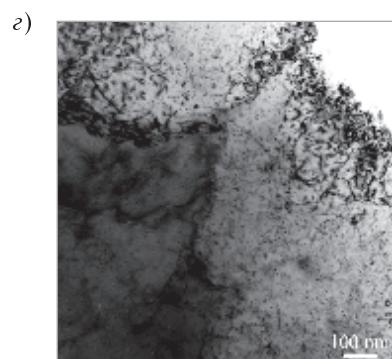
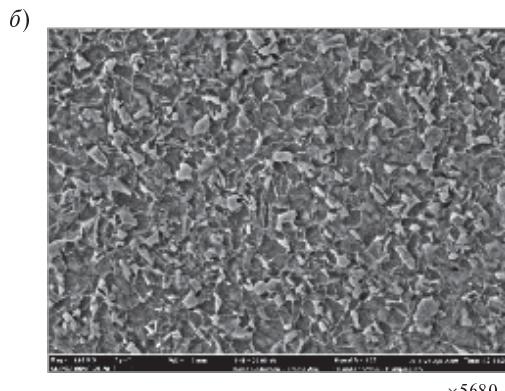
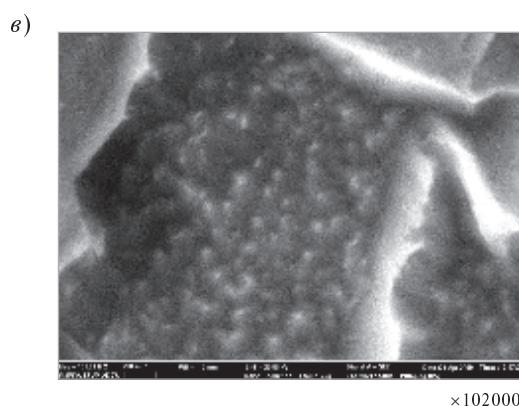
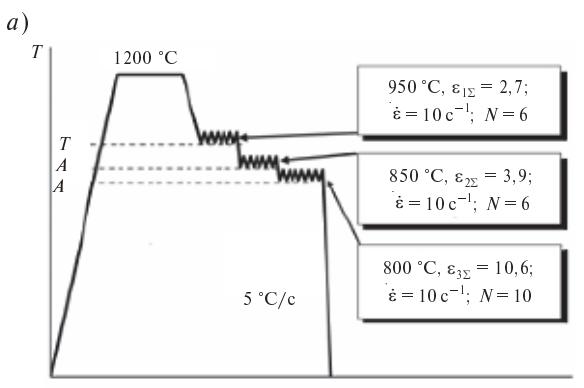


Рис. 3. Режим трехстадийной обработки стали X90 в аустенитной области (а); ферритно-бейнитная структура стали после обработки (б); зерно феррита с карбидами микролегирующих элементов (в, г); б, в — сканирующая микроскопия; г — просвечивающая микроскопия



ускоренное охлаждение со скоростью не менее 5 °С/с до комнатной температуры для предотвращения роста зерна феррита.

Протекание динамической рекристаллизации на первой стадии деформации обеспечивает первичное измельчение зерна и равномерное распределение микролегирующих элементов. Деформация аустенита в условиях заторможенной рекристаллизации при температурах $T_{nr} < T < T_{\phi n}$ должна обеспечить условия его фрагментации и, как следствие, увеличение центров зарождения новой фазы при последующем фазовом превращении, а также измельчение структуры.

На первой стадии обработки суммарная степень деформации составила $\varepsilon_{1\Sigma} = 2,7$; соответственно средняя деформация за одно обжатие равна $\varepsilon_i = 0,45$, пауза между деформациями для обеспечения кантовки образца на 90° $t_1 = 1$ с, скорость деформации 10 c^{-1} . На втором этапе обработки $\varepsilon_{2\Sigma} = 3,9$, количество деформаций — $6 = 10 \text{ c}^{-1}$, на третьем этапе (800 °С) $\varepsilon_{3\Sigma} = 10$, остальные параметры — те же. При температуре 620 °С произведена выдержка в течение 5 с для протекания ферритного превращения. Скорость охлаждения в диапазоне температур 570–300 °С составила ~ 10 °С/с.

Микроструктура образца из стали X90 после обработки по этому режиму представлена на рис. 3, б. Видно, что в результате обработки получена ферритно-бейнитная структура со средним размером 1–2 мкм и практически полигональным ферритом. Сканирующая электронная микроскопия при больших увеличениях обнаруживает «малиновый рельеф» на зернах феррита, сформированный при легком травлении образцов (рис. 3, в). Возникновение подобного рельефа будет обсуждаться далее. Просвечивающая электронная микроскопия показывает, что карбиды и карбонитриды микролегирующих элементов распределены достаточно равномерно и имеют размер 5–20 нм. Равномерное распределение карбонитридов обусловлено дислокационно-стимулированным выделением при правильном построении технологического процесса горячей деформации: отсутствие дислокаций приводит в основном к зернограничному выделению, что значительно снижает комплекс свойств металла.

Таким образом, реализованный режим обработки не позволил получить ультрамелкозернистую или нанокристаллическую структуру ис-

следуемой стали, но обеспечил формирование равномерной мелкозернистой ферритно-бейнитной структуры со средним размером 1–2 мкм, требуемой в современных трубных сталях. Отметим, что ввиду большого количества включений высокодисперсной карбонитридной упрочняющей фазы полигональный феррит не может в полной мере быть охарактеризован как феррит. Его микротвердость составляет 2100–2300 МПа, и, поскольку в феррите присутствует большое количество равномерно распределенных карбидов и карбонитридов, такая структура может быть охарактеризована как бейнитная.

Исследование возможности измельчения зерна на трехстадийной деформацией в аустенитной области и в межкритическом интервале (рис. 4). В отличие от первого, данный режим предусматривает третью деформацию при температуре ниже A_{r3} на (20–40) °С. Деформация в двухфазной области должна ускорить превращение и привести к измельчению структуры. По сравнению с первым режимом увеличены суммарные деформации на каждом из этапов обработки образцов; параметры обработки приведены на рис. 4, а.

Микроструктура образца после обработки по этому режиму представлена на рис. 4, б, в. Как видно, структура является ферритно-бейнитной, в феррите наблюдается большое количество выделений карбонитридов микролегирующих элементов. Структура стали, обработанной по второму режиму, практически не отличается от представленной на рис. 3. Размер зерна составляет 0,5–1 мкм. Сканирующая микроскопия показывает характерный «малиновый» рельеф слегка протравленных ферритных зерен.

Исследование возможности измельчения зерна на интенсивной пластической деформацией, совмещенной с термоциклированием (рис. 5). Режим обработки охарактеризован на рис. 5, а и включает три стадии деформации с общей деформацией $\varepsilon_{\Sigma} \approx 28$, после чего выполняют 5–7 циклов фазовых переходов с быстрым нагревом и охлаждением (не менее 10 °С/с). Микроструктура образца после обработки по этому режиму представлена на рис. 5, б.

В результате выполненной обработки микролегированной стали класса прочности X90 по режиму, представленному на рис. 5, а, получили равномерную структуру игольчатого бейнита (рис. 5, б). Очертание бейнитных колоний показывает, что размер исходного аустенитного зер-

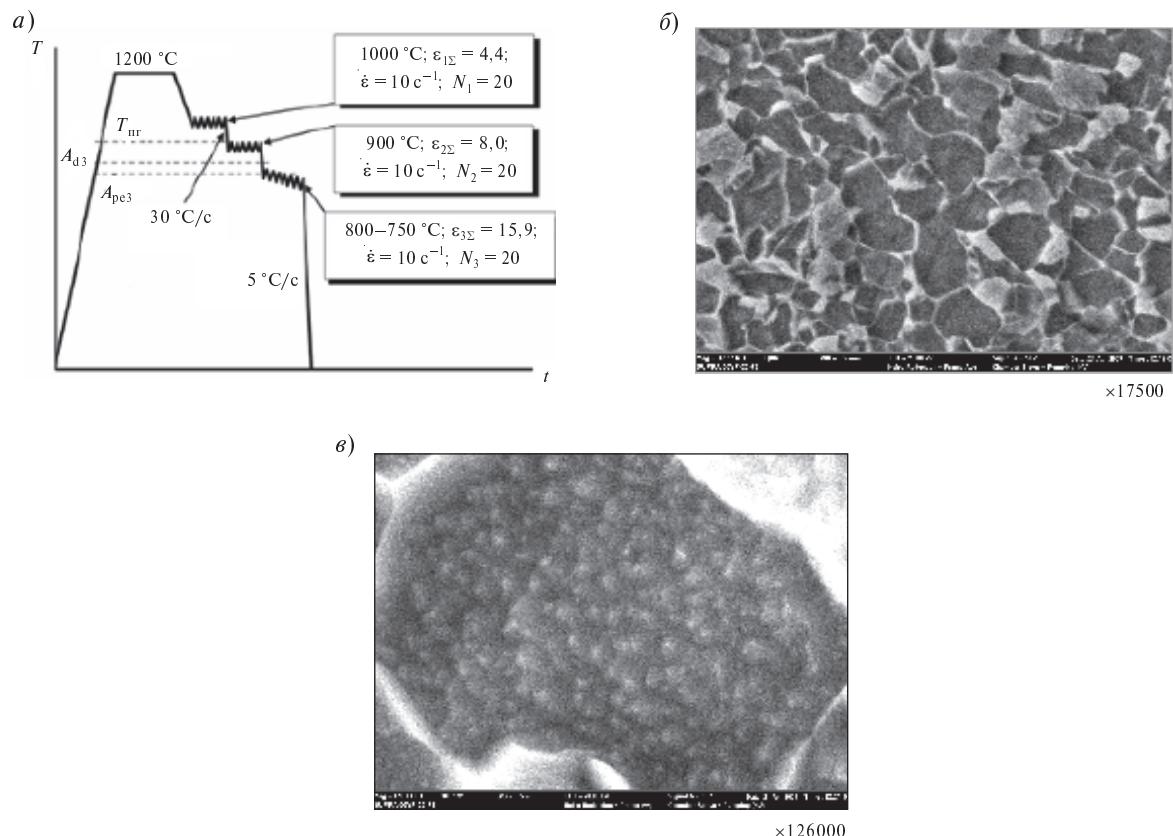


Рис. 4. Режим трехстадийной деформации в аустенитной области и в межкритическом интервале

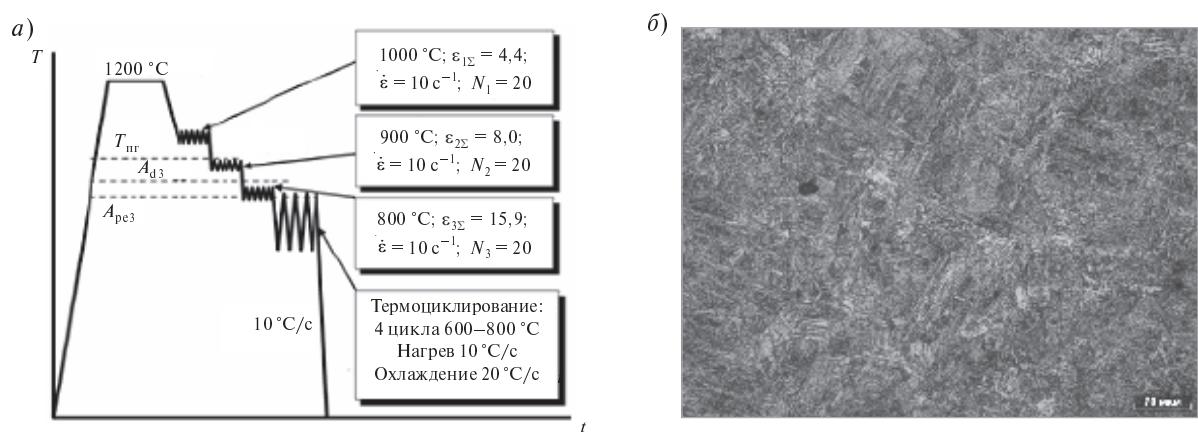


Рис. 5. Режим трехстадийной деформации с последующим термоциклированием (*a*) и структура обработанного металла (*b*)



на достигает 50–70 мкм. По сравнению с предыдущими режимами обработки размер зерна аустенита значительно вырос, что вызвано, очевидно, переходом в аустенитную область при нагреве во время термоциклирования и быстрым ростом зерна после предварительной деформации. Таким образом, в данном случае термоциклическая обработка не оказала положительного воздействия на размер аустенитного зерна и, соответственно, на дисперсность конечной структуры.

Исследование возможности измельчения зерна трехстадийной деформацией в аустенитной области, в межкритическом интервале и окончательной деформации при 700–400 °С (рис. 6). Образцы нагревали до температуры 1200 °С, выдерживали 30 с для аустенизации и растворения избыточных

фаз, затем охлаждали до температуры 1100 °С, после чего деформировали. Первая стадия включала 10 деформаций, причем скорости деформации и обжатия подбирались так, чтобы обеспечить возможность протекания динамической рекристаллизации. Далее образец быстро охлаждали ниже температуры T_{nr} (температуры конца рекристаллизации), после чего выполняли вторую стадию деформирования, которая также включала 10 деформаций. Затем образец быстро охлаждали до температуры 700–400 °С, при которой следовала третья стадия деформации. При каждой из выбранных температур образцы деформировали 100 и 200 раз, затем охлаждали до комнатной температуры. Микроструктуры полученных образцов, полученные на сканирующем электронном микроскопе, представлены на рис. 7–13.

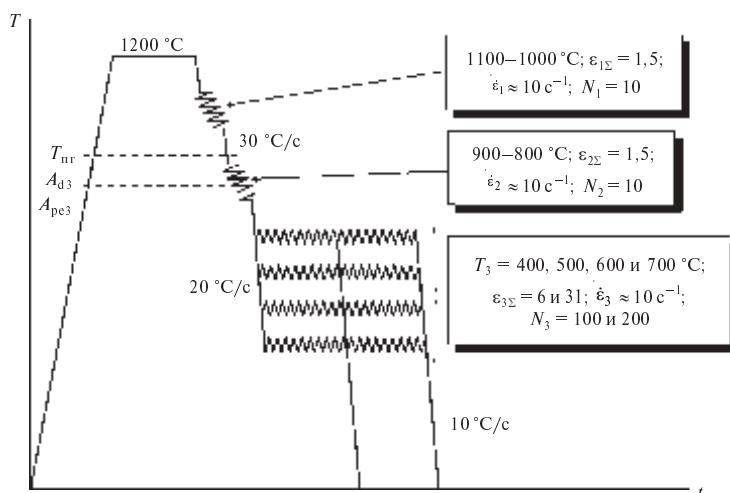


Рис. 6. Режимы обработки стали X90

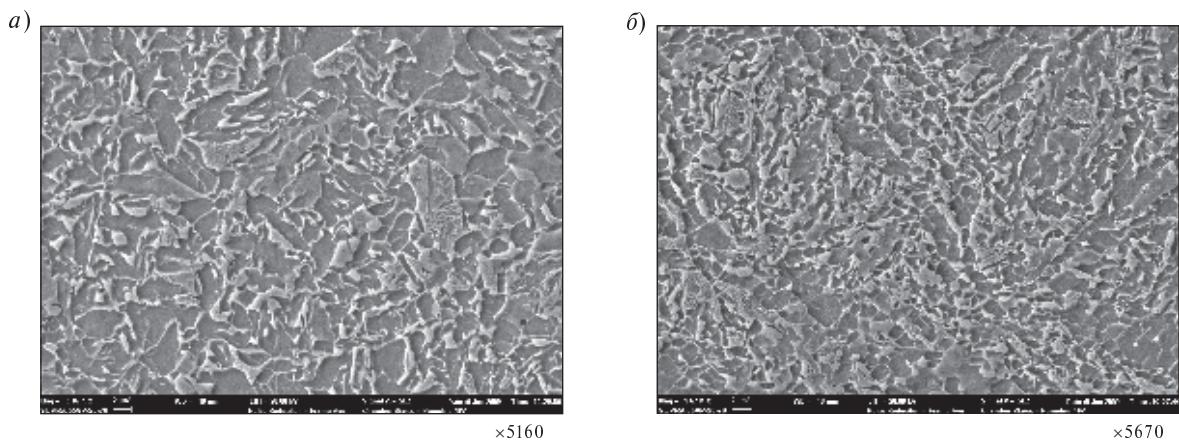


Рис. 7. Структуры стали X90 после обработки; температура третьей стадии деформации 700 °С, $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$; $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$

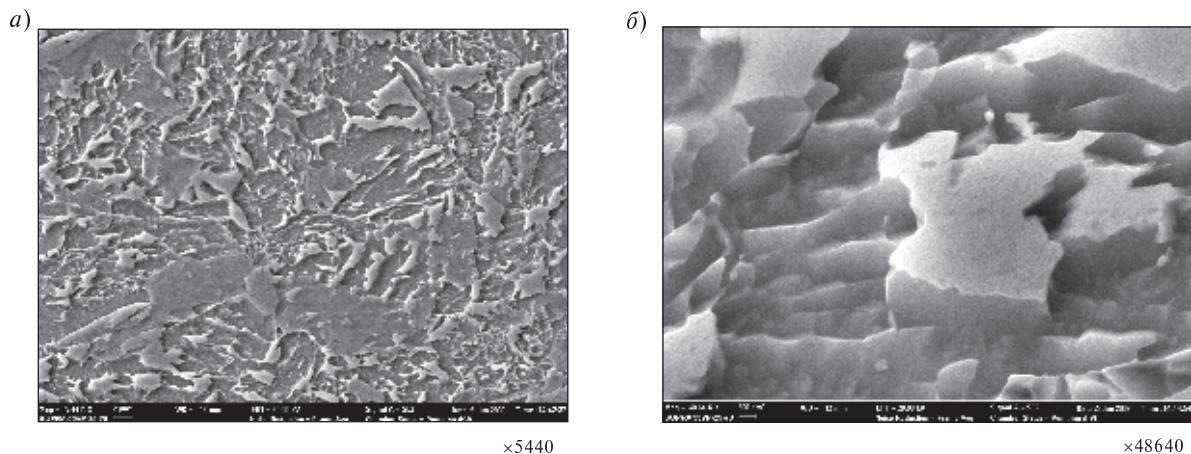


Рис.8. Структуры стали X90 после обработки;
температура третьей стадии деформации $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$

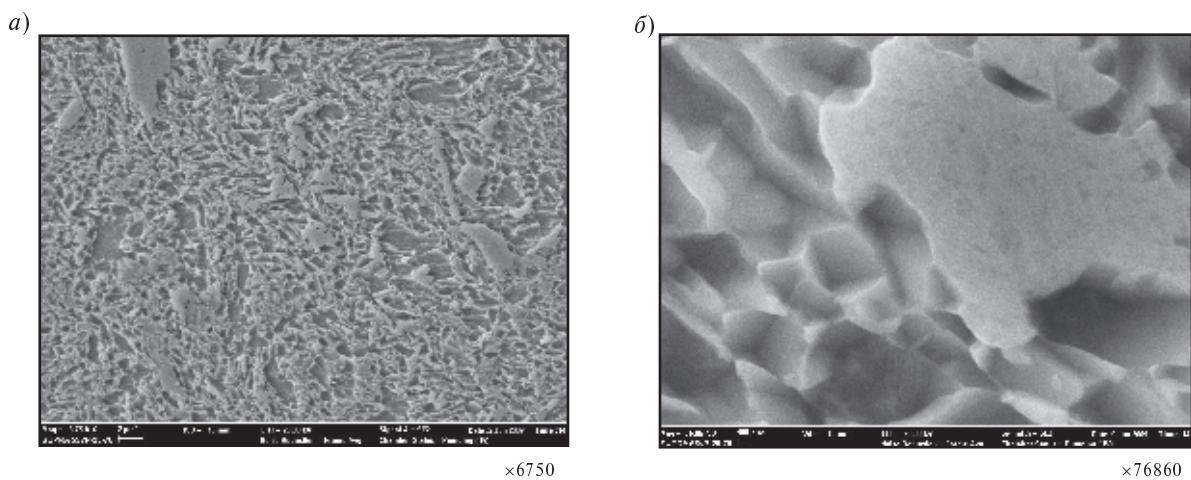


Рис. 9. Структуры стали X90 после обработки;
температура третьей стадии деформации $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$

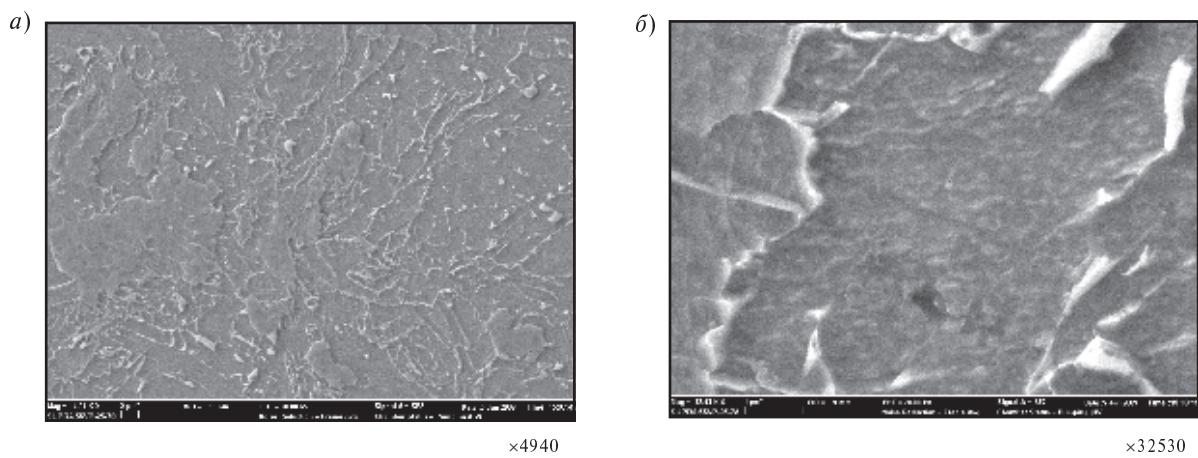


Рис. 10. Структуры стали X90 после обработки;
температура третьей стадии деформации $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$

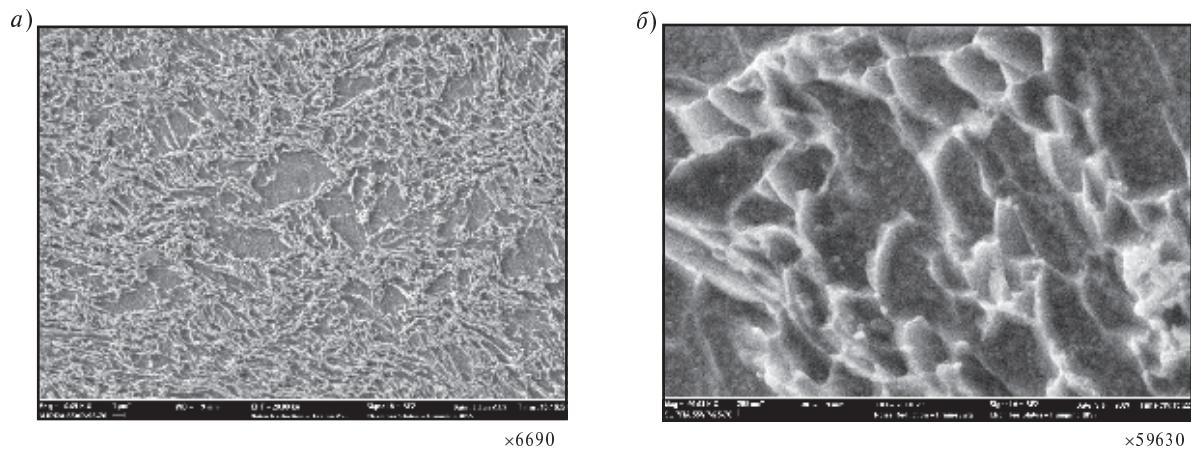


Рис. 11. Структуры стали X90 после обработки;
температура третьей стадии деформации 500 °C, $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$

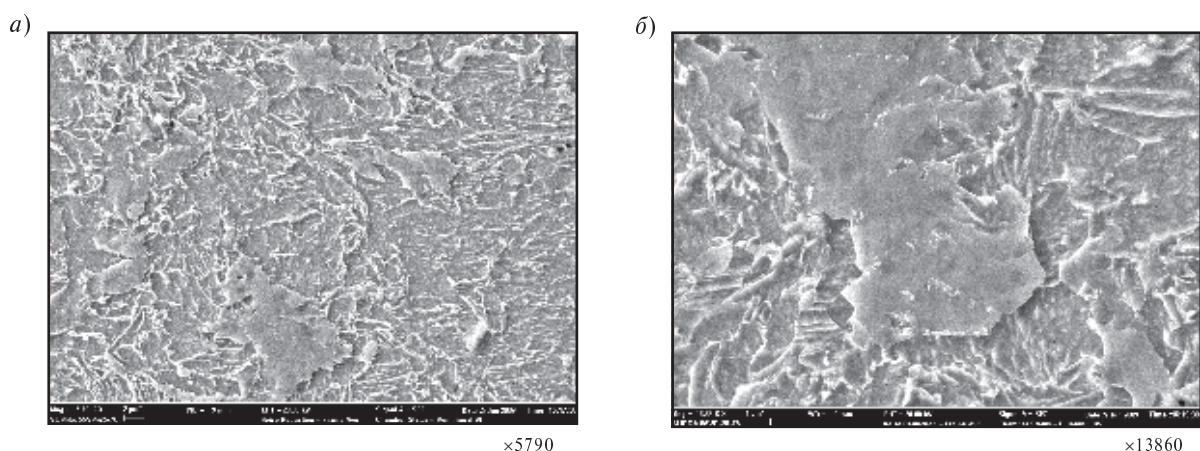


Рис. 12. Структуры стали X90 после обработки;
температура третьей стадии деформации 400 °C, $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$

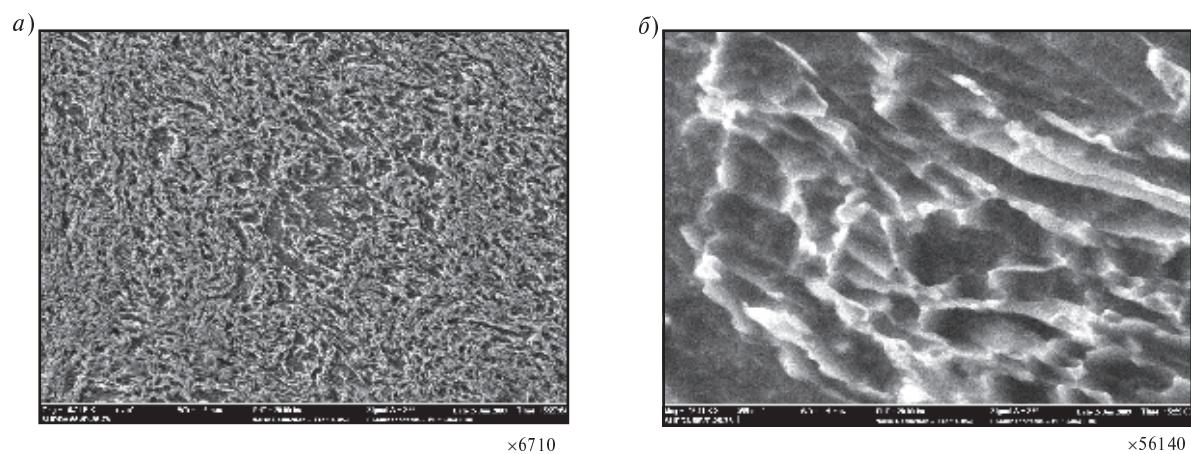


Рис. 13. Структуры стали X90 после обработки;
температура третьей стадии деформации 400 °C, $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$



Панорама фотографий структуры иллюстрирует влияние температуры и степени деформации на конечную структуру материала: при понижении температуры третьего этапа деформаций T_3 и увеличении степени деформации $\varepsilon_{3\Sigma}$ средний размер зерна снижается, а объем металла постепенно заполняется мелким зерном. На рис. 13 представлена структура стали X90 после обработки при температуре $T_3 = 400$ °С и $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$. Средний размер зерна при подобной обработке составляет 150 нм.

Как показывает рис. 7, деформация при 700 °С позволяет получить хорошую ультрамелкозернистую структуру. Деформация при 600 °С (рис. 8 и 9) приводит к формированию структуры, в которой наблюдаются фрагменты размером до 150 нм. Увеличение количества деформаций со 100 до 200 позволяет получить значительно более мелкую структуру. Деформация при 500 °С (рис. 10 и 11) меняет морфологию структуры; при $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$ субструктура бейнита практически не выявляется, однако при $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$ отчетливо видна зернистая структура. Этот эффект еще более отчетливо виден, когда деформация происходит при 400 °С: наблюдаются пластинки бейнита.

Исследование формирования структуры для стали категории прочности X100, высокоазотистой стали, титановых сплавов проводили по таким же режимам, что и для трубной стали категории прочности X90.

На рис. 14 представлена структура образцов из высокоазотистой нержавеющей стали и сплава АМг6, обработанных на модуле MaxStrain

комплекса Cleeble-3800 для получения субмикронной структуры. На рис. 14, *a* хорошо видно, что зернистая («малиновая») структура, характерная для левого зерна и имеющая диаметр ~40–50 нм, представляет собой поперечный срез вытянутых фрагментов, различно ориентированных в соседних зернах. На правой части фотографии (рис. 14, *a*) видно, что фрагменты имеют в основном сигарообразную форму. Образование фрагментов (сигар) происходит за счет образования новых границ во время пластической деформации, условия возникновения которых рассмотрены в [7, 8]. По сути возникновениеnanoструктуры при пластической деформации металлов, механизм измельчения размера зерна, представляют собой именно многократное образование новых границ деформационного происхождения, происходящее на фоне дислокационного механизма деформации. Механизмы формирования этих границ исследуются давно, но впервые отчетливо прослежены стадии формирования фрагментов в [12].

Аналогичную структуру имеет сплав АМг6, однако в данном сплаве структуру выявить методами избирательного травления значительно сложнее и она имеет вид, представленный на рис. 14, *b*.

Анализ структуры методом обратно рассеянных электронов. На рис. 15 представлены результаты анализа структуры образца, обработанного при $T = 600$ °С и $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$ методом обратно отраженных электронов (EBSD). Видно, что зерна вытянуты вдоль направления максимальных деформаций; средний размер зерна составляет при-

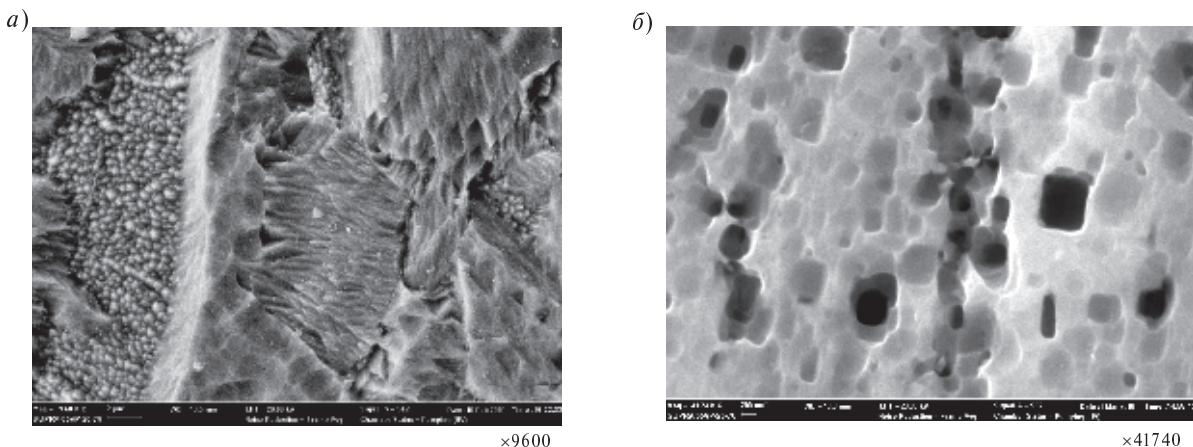


Рис. 14. Микроструктура образцов высокоазотистой нержавеющей стали (*a*) и сплава АМг6 (*b*), обработанных на модуле MaxStrain комплекса Gleeble-3800

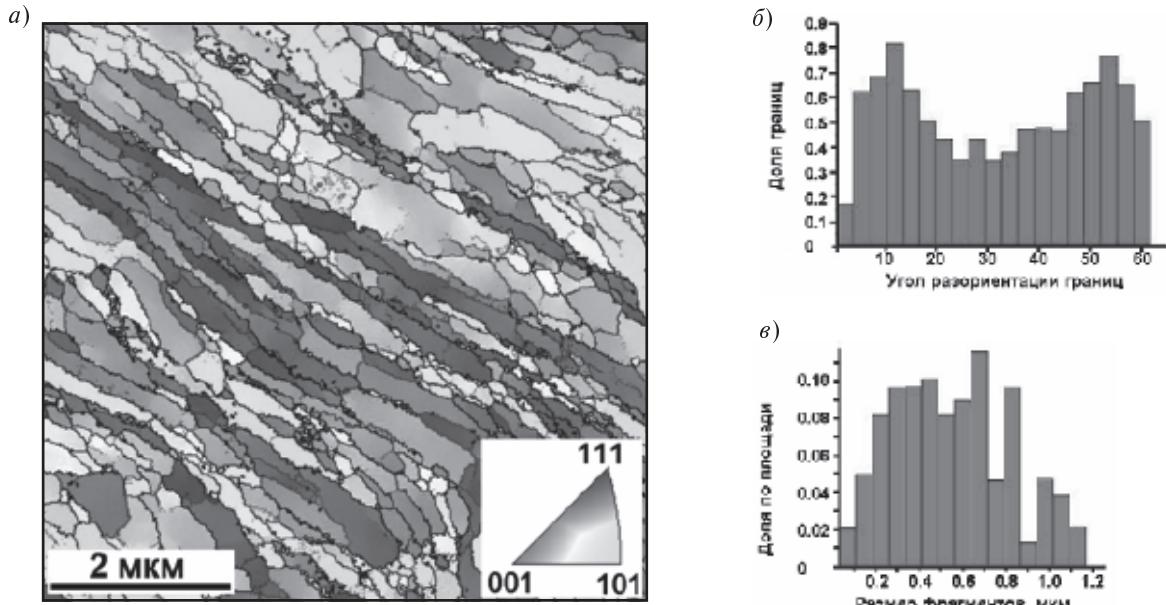


Рис. 15. Результаты анализа структуры образца из трубной стали категории прочности X90 методом обратно отраженных электронов (EBSD), обработанного при $T = 600^{\circ}\text{C}$ и $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$:
 а — цветокодированное изображение микроструктуры, иллюстрирующая разориентацию фрагментов; б — гистограмма распределения углов разориентации соседних зерен;
 в — распределение размеров зерен по размерам

близительно 0,3 мкм. На рис. 15, б отчетливо просматриваются две выраженные разориентации зерен — 12 и 55°, что свидетельствует о том, что межзеренные границы являются большеугловыми. Интересно, что согласно исследованиям, выполненным в [6], углы разориентации 5–15° характерны для верхнего бейнита, углы 50–60° — для нижнего бейнита.

Анализ рис. 15 показывает, что в результате обработки образцов получена структура со средним размером зерна 500 нм, причем около 2 % зерен имеют размер менее 100 нм. Такую структуру металла можно характеризовать как субмикронную. Бимодальное распределение зерен по углам разориентации показывает, что наибольшую вероятность имеют углы 12 и 55°. Именно эти углы разориентации характерны для бейнитных структур в микролегированных низкоуглеродистых сталях [6], причем угол 12° — для пластин верхнего бейнита, угол 55° — для пластин нижнего бейнита. Важно, что углы разориентации составляют десятки градусов, поэтому границы являются большеугловыми.

Тестирование механических свойств материалов с субмикронной и нанокристаллической структурой. На рис. 16 представлены результаты тес-

тирования механических свойств образцов из трубных сталей категории прочности X90 и X100 в виде характерных диаграммы растяжения до и после интенсивной пластической деформации на модуле MaxStrain, а на рис. 17 — зависимостей прочностных и пластических свойств от температуры последней стадии деформации T_3 и суммарной степени деформации $\varepsilon_{3\Sigma}$. Как видно, максимальный прирост прочности наблюдается при $T_3 = 400^{\circ}\text{C}$ и $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$ и составляет по пределу текучести $\Delta\sigma_t = 694$ МПа, по пределу прочности $\Delta\sigma_b = 570$ МПа. Пластичность металла при этом практически нулевая. При сохранении пластичности на исходном уровне (37 %) прибавка к прочностным свойствам такова: по пределу текучести $\Delta\sigma_t = 68$ МПа, по пределу прочности $\Delta\sigma_b = 154$ МПа. Этот режим обеспечивается при $T_3 = 700^{\circ}\text{C}$ и $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$.

Согласно современным представлениям о формировании механических свойств прочностные свойства сталей состоят из нескольких компонентов, в том числе вклада основы (металлическая матрица металла), твердорастворного упрочнения, вклада от плотности дислокаций, упрочнения от преципитатов микролегирующих элементов и вклада межзеренных границ (раз-

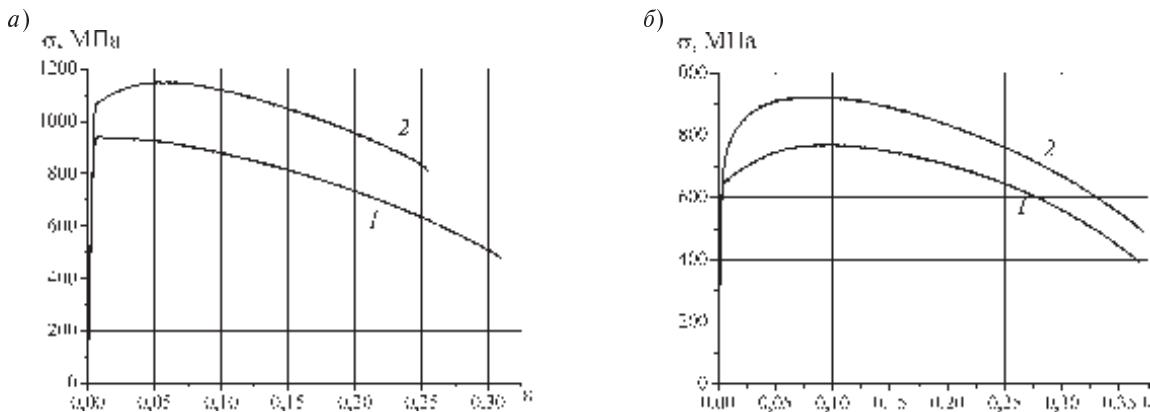


Рис. 16. Кривые «напряжение — деформация» для микролегированных сталей категории прочности X100 (а) и X90 (б): 1 — после контролируемой прокатки; 2 — после дополнительной обработки на получение субмикронной структуры (температура третьей стадии деформации 600 °С, $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$)

мера зерна). Если принять точку зрения авторов работы [6], то для микролегированных феррито-бейнитных сталей вклад в прочностные характеристики от границ зерен составляет примерно 35 %.

Согласно рис. 16, а, в исходном состоянии для исследуемого материала прочностные свойства таковы: $\sigma_t = 646$ МПа, $\sigma_b = 770$ МПа. Следовательно, при $T_3 = 400$ °С и $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$ вклад границ зерен в формирование прочностных свойств составляет $\Delta\sigma_T^{rp} = 226$ МПа, $\Delta\sigma_B^{rp} = 270$ МПа. Таким образом, если полагать, что все упрочнение, приобретенное сталью во время дополнительной обработки на комплексе Gleeble, обусловлено только новыми границами, образованными во время деформации, то прибавки по механическим

свойствам оказываются значительными: по пределу текучести $\Delta\sigma_t/\Delta\sigma_T^{rp} = 3,07$ (307 %), по пределу прочности $\Delta\sigma_b/\Delta\sigma_B^{rp} = 2,11$ (211 %).

Если выбрать режим обработки, обеспечивающий сохранение пластичности ($T_3 = 700$ °С и $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$), то прибавка к пределу текучести $\Delta\sigma_T^{rp}$ составляет 30 %, а к пределу прочности 57 %.

На рис. 18 показана схема обработки, принятая для титана BT1-0 и титанового сплава ПТ-3В, а также изменение вида кривых «напряжение — деформация» для этих материалов. Видно, что наибольшего эффекта повышения прочностных свойств удалось добиться для технического титана BT1-0, для которого другие механизмы упрочнения, кроме измельчения размера зерна,

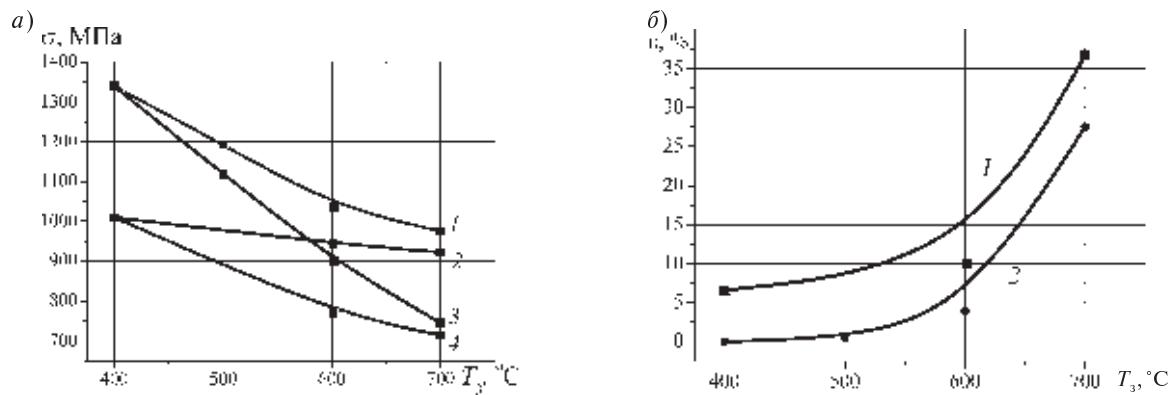


Рис. 17. Зависимость прочностных и пластических характеристик трубной стали категории прочности X90 от температуры и степени деформации на 3-й стадии обработки: а — прочностные характеристики (1 — σ_b при $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$; 2 — σ_t при $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$; 3 — σ_b при $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$; 4 — σ_t при $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$); б — пластические характеристики (1 — при $\varepsilon_{3\Sigma} = 31$; 2 — при $\varepsilon_{3\Sigma} = 6$)

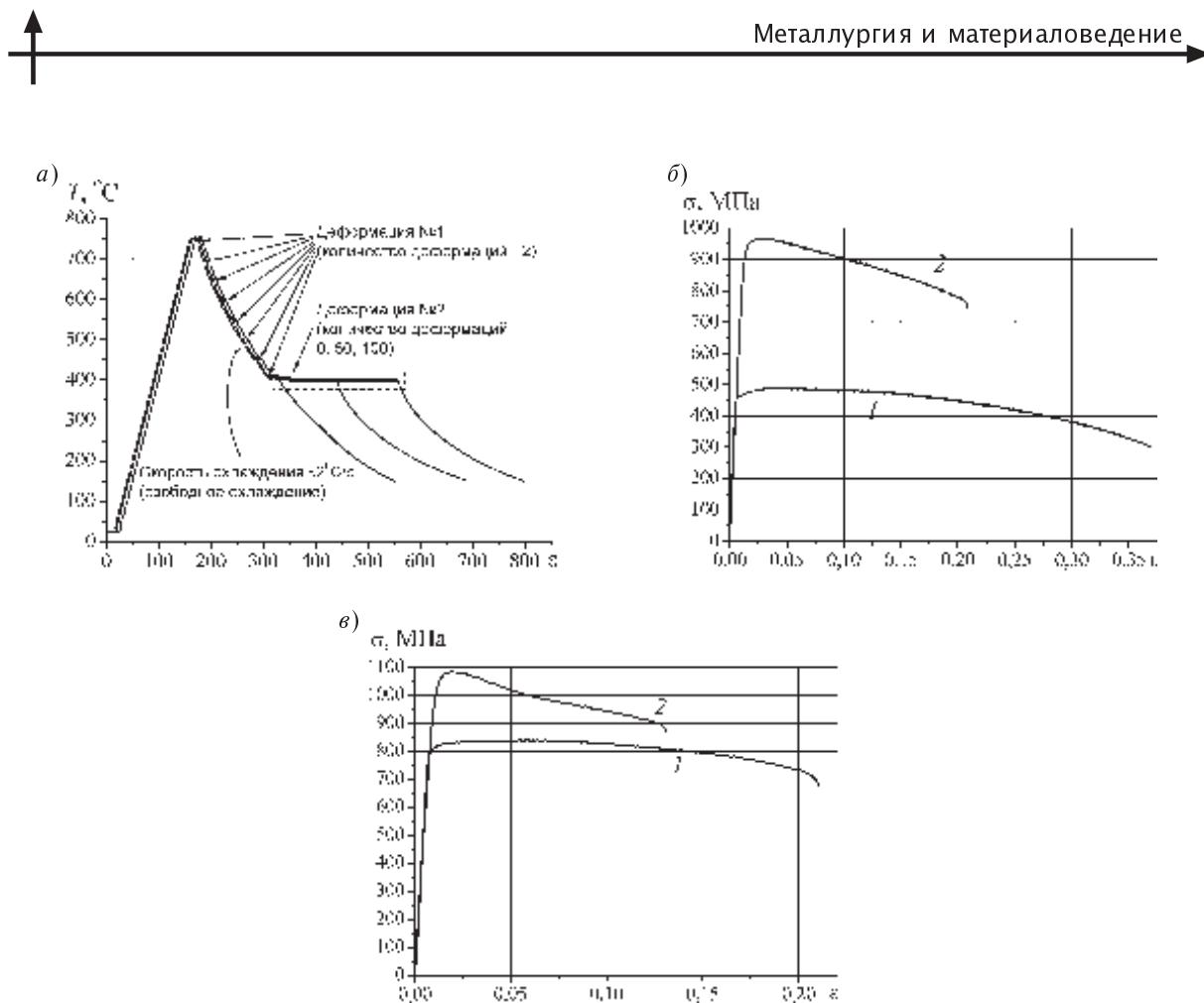


Рис. 18. Режимы обработки титана ВТ1-0 и титанового сплава ПТ-3В (а) и кривые «напряжение — деформация» для титана (б) и титанового сплава (в) в состоянии поставки (I) и обработанного на установке *Gleebel-3800* (2)

не применяются. Для титанового сплава ПТ-3В эффект упрочнения, как видно по рис. 18, б, значительно ниже. Заметим, что пластическая деформация титана и его сплава выполнялась при температурах ниже точки полиморфного превращения.

Алюминиевый сплав АМг-6 обрабатывали по режиму, охарактеризованному на рис. 19, а. Видно, что обработку проводили в изотермическом режиме, а охлаждение после деформации происходило естественным путем в основном за счет теплоотвода в захваты обрабатывающего устройства. Температуру деформации назначали 200, 300, 400 °С, суммарная логарифмическая степень деформации достигала $\varepsilon_{\Sigma} = 50$, а количество деформаций составляло 50, 100 и 150.

Характерное изменение диаграммы растяжения для сплава АМг6 представлено на рис. 19, б, а изменение прочностных и пластических свойств — на рис. 19, в, г.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Многократная пластическая деформация в горячем и теплом состояниях позволяет изменять структуру и механические свойства сталей и сплавов в широких пределах. Измельчение структуры металлов происходит путем формирования новых межзеренных мало- и большеугловых границ в результате перестройки дислокационных структур, активированной деформационным упрочнением и диффузионными процессами. Оптимальное сочетание температуры, контролирующей рост вновь образованных зерен, и степени деформации позволяет получить требуемую структуру, обеспечивающую заданный уровень механических свойств.

2. После многократной деформации в austenитной области при обеспечении условий протекания динамической рекристаллизации в исследуемых новых трубных сталях может быть получена равномерная микроструктура с разме-

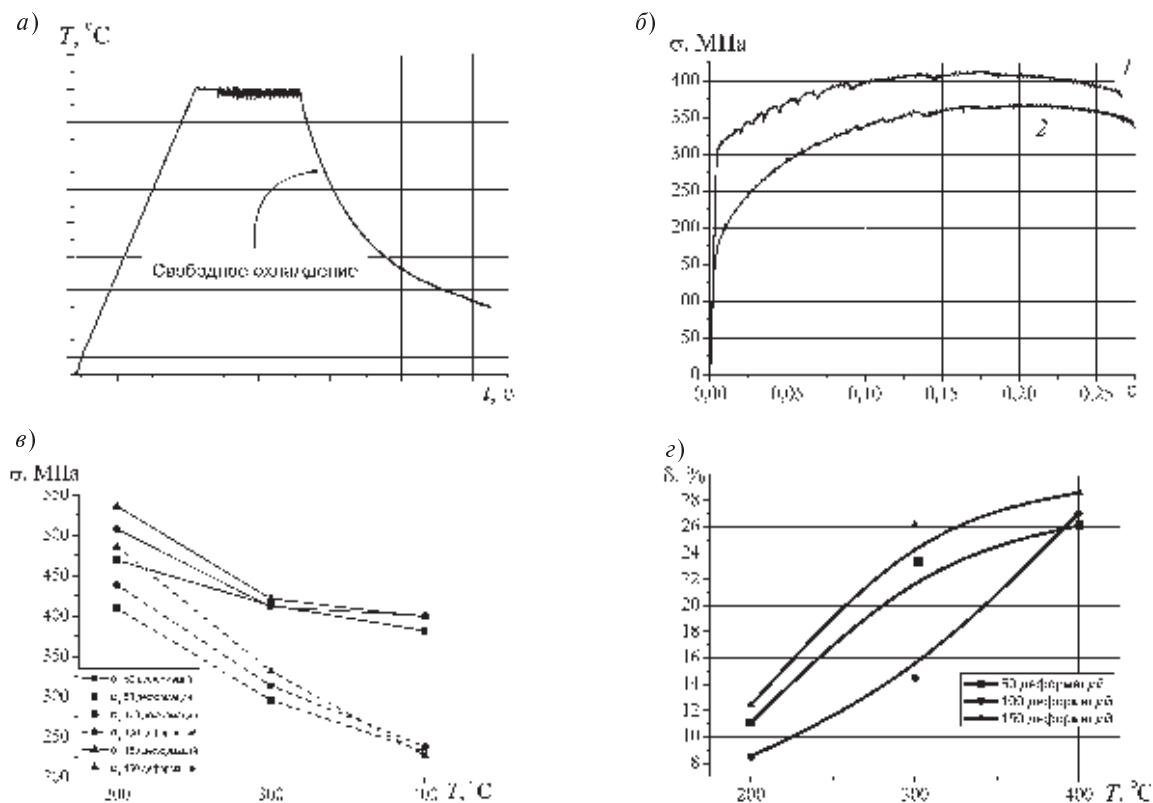


Рис. 19. Режимы обработки алюминиевого сплава АМг6 (а);
характерное изменение диаграммы растяжения (б) для металла в состоянии поставки (1)
и после интенсивной пластической деформации (2); изменение прочностных (в)
и пластических (г) свойств сплава

ром зерна 0,5–1 мкм. Возможно, подобная структура оптимальна в плане соотношения прочностных и пластических свойств. Увеличение общей деформации и перемещение (снижение) температуры конца деформации в верхнюю часть двухфазной области существенно не изменяют конечную структуру металла.

3. Термоциклическая обработка металла после окончания деформации приводит к укрупнению размера зерна аустенита и получению достаточно однородной бейнитной структуры.

4. Понижение температуры деформации до 700–400 °С и увеличение суммарной степени де-

формации приводит к постепенному заполнению объема металла новыми границами мелких зерен и понижению размера зерна до 150 нм. Это вызывает значительное упрочнение за счет эффекта зернограничного упрочнения (до 300 %), однако при этом происходит падение пластичности практически до нулевой отметки. Режимы обработки, обеспечивающие сохранение пластичности на исходном уровне, дают добавку к зернограничному упрочнению 30–50 %.

5. Аналогичные результаты можно получить при обработке алюминиевых и титановых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров. — М.: Логос, 2000.— 272 с.
2. Сегал, В. М. Процессы пластического структурообразования металлов [Текст] / В.М. Сегал [и др.]. — Минск: Навука і тэхніка, 1994. — 232с.— ISBN 5— 343— 01164— 0.
3. Бриджмен, П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва [Текст] / П.В. Бриджмен. — М.: Изд— во иностранной литературы, 1955. — 444 с.



4. Салищев, Г.А. / Г.А. Салищев, О.Р. Валиахметов, Р.М. Галеев, С.П. Малышева // Металлы.— 1996. № 4.— С. 86.
5. Gmez M. Assessment of Austenite Static Recrystallization and Grain Size Evolution during Multi-pass Hot Rolling of a Niobium-Microalloyed Steel [Текст] / M. Gmez, L. Rancel, S.F. Medina.— Met. Mater. Int., 2009. Vol. 15. No. 4. P. 689–699.
6. Quantitative Structure-Property Relationships for Complex Bainitic Microstructures [Текст] / Commission of European Communities ECSC Sponsored Research Project // Final Report. Swedish Institute For Metals Research.— 2003.
7. Колбасников, Н.Г. Теория обработки металлов давлением. Сопротивление деформации и пластичность [Текст] / Н.Г. Колбасников.— СПб., Изд-во СПбГПУ, 2000.— 320 с.
8. Колбасников, Н.Г. Энтропия. Структура. Фазовые превращения и свойства металлов [Текст] / Н.Г. Колбасников, С.Ю. Кондратьев.— СПб.: Наука, 2006.— 360 с.
9. Владимиров, В.И. Дисклинации в кристаллах [Текст] / В.И. Владимиров, А.Е. Романов.— Л.: Наука, 1986. 226 с.
10. Дисклинации и ротационная деформация твердых тел [Текст] / Ред. В.И. Владимиров. Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе.— Л., 1988.— 227 с.
11. Физика износостойкости поверхности металлов [Текст] / Ред В.И. Владимиров; ФТИ им. А.Ф. Иоффе.— Л., 1988.— 229 с.
12. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов [Текст] / В.В. Рыбин.— М.: Металлургия, 1986.— 224 с.

УДК 621.74.01:669.14

В.М. Голод, К.И. Емельянов

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕТИКИ И ПЛНОТЫ ПЕРИТЕКТИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Перитектическое превращение — важный этап кристаллизации ряда промышленных металлических сплавов (углеродистые и нержавеющие стали, оловянные бронзы и латуни, алюминиевые сплавы), оказывающее существенное влияние на их механические свойства и склонность к горячим трещинам (вследствие значительных объемных изменений), а также химическую и структурную неоднородность литого металла [1–3 и др.]. Для формирования структуры и свойств сплавов, которые в равновесных условиях относятся к перитектическому типу, большое значение имеет оценка роли тех металургических и технологических факторов, которые определяют неравновесный характер кристаллизации и полноту реализуемого при этом перитектического превращения.

Механизм перитектического превращения в сплавах на основе железа, несмотря на значительное число выполненных ранее и активно проводимых исследований, остается дискуссионным, и для его уточнения в последние годы использованы различные экспериментальные методы [4, 5] и компьютерный анализ [5, 6].

Согласно основной схеме реализации перитектического превращения в сплавах Fe-C [7–9 и др.], вскоре после начала перитектической реакции тонкая пленка γ -фазы, весьма быстро распространяющаяся по поверхности выделений первичной δ -фазы, отделяет их от расплава, после чего формирование γ -фазы сосредоточивается на подвижных границах L/γ (кристаллизация из расплава $L \rightarrow \gamma$) и γ/δ (твердофазное превращение $\delta \rightarrow \gamma$ за счет диффузионно переносимого углерода) (рис. 1).

При анализе скорости диффузионного переноса избыточного углерода (заштриховано на рис. 1, б) от границы L/γ к границе γ/δ в изотермических условиях получено уравнение кинетики перитектического превращения [1]

$$\Delta_\gamma = \left[2D_\gamma (\Omega_{\gamma\delta} + \Omega_{L\gamma}) \tau \right]^{1/2};$$
$$\Omega_{\delta\gamma} = \frac{C_{\gamma L} - C_{\gamma\delta}}{C_{\gamma\delta} - C_{\delta\gamma}}; \quad \Omega_{\gamma L} = \frac{C_{\gamma L} - C_{\gamma\delta}}{C_{L\gamma} - C_{\gamma L}}, \quad (1)$$

где Δ_γ — толщина межфазной прослойки γ -фазы; D_γ — коэффициент диффузии в γ -фазе; τ — вре-

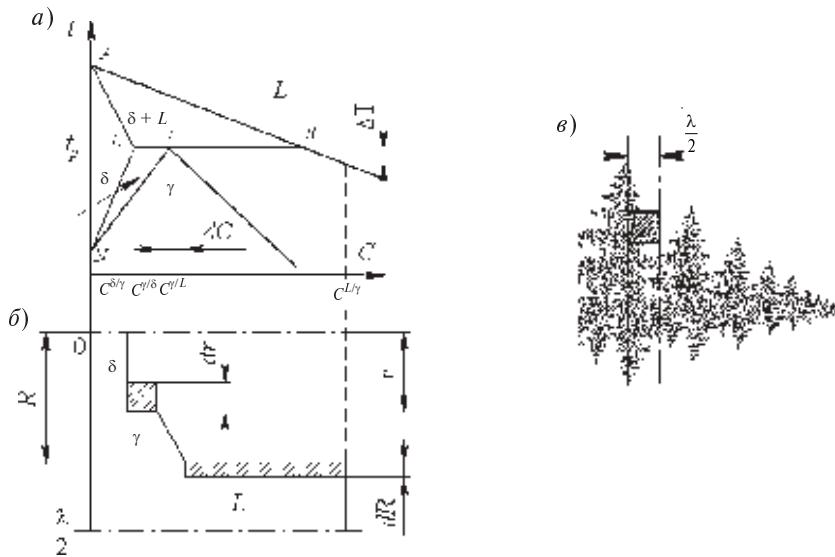


Рис. 1. Схема перитектического превращения
в условиях термического переохлаждения сплавов Fe-C (а)
при диффузионном перераспределении углерода
в системе <δ-фаза>/<γ-фаза>/<расплав> (б) в дендритной микроячейке (в)

мя превращения; $C^{γ/L}$, $C^{γ/δ}$, $C^{δ/γ}$ — концентрация углерода на межфазовых границах, смещенных относительно равновесных значений C_H , C_J и C_B , с учетом переохлаждения $ΔT$ и наклона p_i соответствующих линий диаграммы состояния (рис. 1, а).

Формула (1), полученная для плоской границы раздела [1, 8], неявно связывает толщину $Δz$ слоя $γ$ -фазы с величиной заданного термического переохлаждения $ΔT$, которое зависит от условий теплоотвода и в свою очередь определяет $ΔC = ΔTΔp = ΔT(1/p^{γ/L} + 1/p^{γ/δ})$ — перепад концентраций в слое $γ$ -фазы (рис. 1, б), являющейся движущей силой диффузионного переноса углерода в этом слое. Необходимые условия для полной реализации превращения [10] обеспечиваются сочетанием его длительности, масштаба дендритной структуры, формирующейся на этапе выделения $δ$ -фазы, и соответствующего критического переохлаждения T_p относительно перитектической температуры t_p :

$$ΔT = ΔT_p \geq λ^2 \frac{(C_B - C_J)}{4D_{γ}τ_3Δp} m_{γ}, \quad (2)$$

где $λ$ — ширина междуосных промежутков дендритных кристаллитов; $τ_3$ — локальная продолжительность затвердевания; $m_{γ}$ — относительная доля $γ$ -фазы. Соотношение (2) — эффективно,

оно позволяет приближенно выявить влияние факторов различной природы на кинетику процесса и его результат, важный для характеристики получаемой структурной и химической неоднородности.

Оценку необходимого термического переохлаждения производили на основе соотношения (2) с учетом коэффициента диффузии $D_{γ} = D_0 \exp(-Q/RT)$ в $γ$ -фазе при $D_0 = 0,076 \text{ м}^2/\text{с}$ и $Q = 134,6 \text{ кДж/моль}\cdot\text{К}$ [10] для характерных значений ширины междуосных промежутков дендритов [11], рассчитываемых на основе экспериментально полученного соотношения

$$λ(\text{мкм}) = (169,1 - 720,9C_0)V^{-0.4935},$$

где C_0 — содержание углерода в сплаве, %; V — скорость охлаждения, К/с.

Полученные результаты [12] свидетельствуют, что при продолжительности затвердевания $τ_3 = 25\text{--}2300 \text{ с}$ и ширине междуосных промежутков $λ = 35\text{--}80 \text{ мкм}$ соответствующие значения переохлаждения $ΔT_p$ достигают $1,5 \text{ К}$, что не превышает номинальной величины термического переохлаждения ($ΔT = 5\text{--}10 \text{ К}$), свидетельствуя о практически полном прохождении диффузии углерода и, соответственно, диффузионно-равновесном характере кристаллизации сплавов Fe-C. Этот вывод вполне согласуется с расчетными данными прежних публикаций [1, 6, 7], которые



свидетельствуют, что во всем интервале концентраций углерода перитектическое превращение полностью завершается в зависимости от скорости кристаллизации (8–80 мкм/с) в узком интервале переохлаждений (6–10 К).

Для детальной оценки критических условий, определяющих полноту перитектического превращения, осуществлено моделирование сопряженных процессов теплообмена и диффузии при кристаллизации мезомасштабной ячейки ($R_0 = 0,01$ м) перитектического сплава Fe—0,16 % С при граничных условиях третьего рода:

$$dt = (-\alpha \vartheta d\tau + L\rho dm) / R_0 c \rho, \quad (3)$$

где t — температура; α — коэффициент теплоотдачи; ϑ — разность температур сплава и окружающей среды; τ — время; m — доля твердой фазы; R_0 — приведенная толщина мезоэлемента; ρ — плотность сплава; L — скрытая теплота кристаллизации; c — теплоемкость сплава. Значения теплофизических характеристик исследуемых сплавов (критические температуры, теплоемкость, теплота кристаллизации различных фаз) определяли на основе термодинамического моделирования [10] с расчетом соответствующих поэтапных изменений энталпии.

Для сплава системы Fe—С перитектического состава принимали значения скрытой теплоты кристаллизации феррита L_δ , аустенита L_γ и превращения $\delta > \gamma L_\delta$, равными соответственно 1930, 2140 и 10,7 МДж/м³; объемную теплоемкость жидкой фазы C_L , c_δ и c_γ для δ - и γ -фазы — равными 5,70; 5,30 и 4,95 МДж/(м³·К). Оценку влияния условий теплоотвода проводили при варьировании коэффициента теплоотдачи в пределах от 1 до 100 Вт/(м²·К). Изменение состава жидкой фазы C_L и соответственно ее температуры ликвидуса t_L рассчитывали по формулам $C_L(\tau) = C_0(1 - m(1 - k))^{-1}$ и $t_L(\tau) = t_L(C_0) + p_r(C_L - C_0)$, рассматривая равновесное перераспределение углерода между фазами с коэффициентом распределения k (величину его при выделении δ - и γ -фазы принимали равной соответственно $k_\delta = 0,18$ и $k_\gamma = 0,34$) [10].

При снижении температуры ниже ликвидуса (рис. 2, а) возникает термическое переохлаждение $\Delta T(\tau) = t_L(\tau) - t(\tau)$, вызывающее образование центров кристаллизации δ -фазы с объемной плотностью N и их рост с линейной скоростью, зависящей от переохлаждения со-

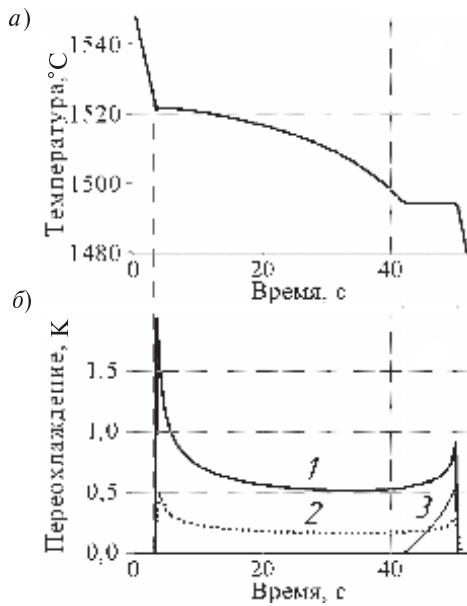


Рис. 2. Кинетика изменения температуры (а) и переохлаждения (б) — термического ΔT (1, 2) и критического $\Delta\Phi_p$ (3) — сплава Fe — 0,16 % С при различной объемной плотности центров кристаллизации сплава:
1 — $N = 10^8$ м⁻³; 2 — $N = 10^{11}$ м⁻³

гласно уравнению $V = K_V \Delta T^2$. Соответствующее изменение количества твердой фазы, которое рассчитывали по уравнению

$$\frac{dm}{d\tau} = 3\varphi N(1-m) V^3 \tau^2 \quad (4)$$

(φ — коэффициент формы кристалла), сопровождается относительно глубоким начальным переохлаждением при образовании кристаллитов (рис. 2, б) с последующим его резким снижением в результате выделения теплоты кристаллизации. В области минимального переохлаждения по достижении перитектической температуры после возникновения прослойки γ -фазы на границе раздела фаз L/δ происходит пространственно разделенное превращение, включающее выделение γ -фазы из расплава на возникшей границе L/γ и формирование слоя γ -фазы на границе γ/δ (рис. 1).

В масштабе междуосного микроэлемента размером $\lambda/2$ (рис. 1, б), имеющего вследствие дендритной морфологии цилиндрическую конфигурацию (рис. 1, б), рассчитывали изменение размеров областей δ -фазы r и жидкой фазы R в процессе перитектического превращения. Из-

быточный углерод $dQ_R = 2\pi R(C^{L\gamma} - C^{\gamma L})dR$, выделившийся в результате кристаллизации из расплава слоя $dR = \lambda^2/(8R)dm$, диффундирует через оболочку γ -фазы:

$$dQ_D = 2\pi RD_\gamma \frac{C^{L\gamma} - C^{\gamma\delta}}{R-r} d\tau. \quad (5)$$

При этом он вызывает соответствующее пе-

$$\text{ремещение границы } \gamma/\delta: dr = -\frac{dQ_D}{2\pi r (C^{\gamma\delta} - C^{\delta\gamma})},$$

если $dQ_R = dQ_D$ и имеет место достаточно глубокое термическое переохлаждение ΔT при необходимом перепаде концентраций ΔC . В противном случае диффузионный перенос углерода реализуется лишь частично, приводя к меньшей скорости движения границы γ/δ и, как следствие, к сохранению остаточной δ -фазы. В случае, когда $dQ_R = dQ_D$, избыточная часть углерода, выделяясь в жидкую фазу, приводит к изменению ее состава

$$dC_L = (dQ_R - dQ_D) \left[\pi \left(\frac{\lambda^2}{4} - R^2 \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

и, соответственно, температуры ликвидуса, а также переохлаждения расплава.

Сопоставление значений текущего переохлаждения ΔT с критическим переохлаждением ΔT_p (рис. 2, б), мгновенное значение которого определяется из соотношения

$$\Delta T_p = \frac{(C_B - C_J) \frac{dR}{d\tau}}{\frac{D_\gamma \Delta p}{(R-r)} - \Delta p_L \frac{dR}{d\tau}}; \quad \Delta p_L = \frac{1}{p_{L\gamma}} - \frac{1}{p_{\gamma L}}, \quad (7)$$

свидетельствует, что варьирование плотности центров кристаллизации, как и ряда других факторов (интенсивность теплоотвода, линейная скорость кристаллизации и др.) способно изменить соотношение между ΔT и ΔT_p , т. е. повлиять на полноту перитектического превращения и соответственно изменить фазовый состав его продуктов и их химическую микронеоднородность, при моделировании которой необходимо учитывать кинетику превращения.

Важно при этом, что высокая диффузионная подвижность углерода — элемента внедрения — обеспечивает полноту перитектического превращения и близкий к равновесному ход его пере-

распределения между фазами. В то же время элементы замещения в стали, отличающиеся значительно более низкими значениями коэффициентов диффузии в твердой фазе, приобретают весьма неравномерное распределение, характер которого непосредственно связан с кинетикой и полнотой превращения [10].

Отмеченные для сплавов Fe—C закономерности превращения присущи всем сплавам перитектического типа, в частности нержавеющим стальям. Как показано на примере сплава Fe—Cr—Ni (рис. 3), из-за увеличения коэффициента теплоотдачи не только значительно сокращается продолжительность превращения, но также уменьшается количество образующейся γ -фазы при сохранении возрастающего количества остаточной (метастабильной) δ -фазы, что вполне согласуется с экспериментальными данными [13].

В сплавах на алюминиевой основе, для которых в равновесных условиях характерно образование начальных блоков диаграмм состояния перитектического типа с рядом переходных элементов (Ti, Zr, Cr, V и др.) [14], перитектическая реакция происходит в условиях, когда диффузия в твердой фазе практически подавлена ввиду низкого значения коэффициента диффузии второго компонента в оболочке ГЦК-фазы. В результате перитектическая реакция после ее возникновения подавляется [3], поэтому остаточная жидккая фаза кристаллизуется путем выделения α -Al — твердого раствора, являющегося в этих условиях метастабильной фазой.

Критериальный анализ [15] зависимости безразмерного термического $(\Omega_{\Delta T})_T = \frac{c}{L} \Delta T_T$ и диффузионного $(\Omega_{\Delta T})_D = \frac{c}{L} \Delta T_D$ переохлаждений от величины определяющих критериев позволяет произвести свертку совокупности параметров различной природы (термодинамических, теплофизических, кристаллизационных, диффузионных и т. д.) и выявить обобщенные зависимости, определяющие полноту перитектического превращения.

Процесс теплообмена в системе описывает группа теплофизических критериев

$$Bi = \alpha R_0 / \lambda; \quad Fo = a_m \tau_3 / R_0^2; \quad K_L = L / c_m \vartheta, \quad (8)$$



определяющих кинетику теплоотдачи от металла (индекс « N ») к окружающей среде, изменение его температуры ϑ и продолжительность τ_3 затвердевания. Формирование структуры описывается группой кристаллизационных критериев:

$$\Omega_N = (\phi N)^{1/3} R_1; \quad \Omega_V = VR_1/2;$$

$$(\Omega_{\Delta T})_T = \Delta T_T \frac{c}{L}, \quad (9)$$

определяющих в микромасштабе R_1 количество N и скорость роста V центров кристаллизации в зависимости от переохлаждения расплава ΔT . Перераспределение компонентов сплава при кристаллизации описывается группой физико-химических критериев:

$$\Omega_P = pC_0(1-k) \frac{c}{L}; \quad \Omega_D = V\lambda/2D_S;$$

$$(\Omega_{\Delta T})_D = \Delta T_D \frac{c}{L}, \quad (10)$$

определяющих интенсивность накопления компонентов на межфазной границе и их диффузионного переноса в расплаве и твердой фазе, ширину междуосных дендритных промежутков λ и скорость затвердевания V в зависимости от состава сплава C_0 , наклона линии ликвидуса p , коэффициента распределения компонентов между фазами k и коэффициента диффузии D_S в твердой фазе. Применимельно к перитектическому превращению: $\Omega_P = \Delta p \Delta C(1-k) \frac{c}{L}$; k_γ — коэффициент распределения углерода при выделении γ -фазы из расплава.

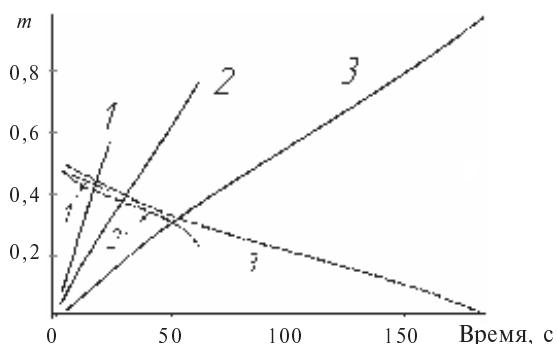


Рис. 3. Изменение доли δ -фазы m_δ (— · —) и γ -фазы m_γ (—) в процессе перитектического превращения в сплаве Fe-10 % Cr-7 % Ni при различных значениях коэффициента теплоотдачи α , Вт/(м²·К): 1 — 25; 2 — 10; 3 — 3

Зависимость критического диффузионного переохлаждения от критериев Ω_P и Ω_D , а также от количества γ -фазы m_γ , разделяющей области расплава и δ -фазы, с учетом соотношения (2) определяет формулу

$$(\Omega_{\Delta T})_D = \Delta T_D \frac{c}{L} = \frac{\Omega_P}{\Omega_D} m_\gamma. \quad (11)$$

Результаты критериального анализа при моделировании хода перитектических превращений в сплавах Fe-C и Al-Cr в зависимости от значений Ω_N , Ω_V и Ω_D при варьировании условий теплоотвода и параметров кристаллизации в широких пределах ($N = 10^6$ – 10^{11} м⁻³; $K_V = 0,20$ – $1,50$ от номинального значения $V = 0,3$ мкм/с) представлены на рис. 4.

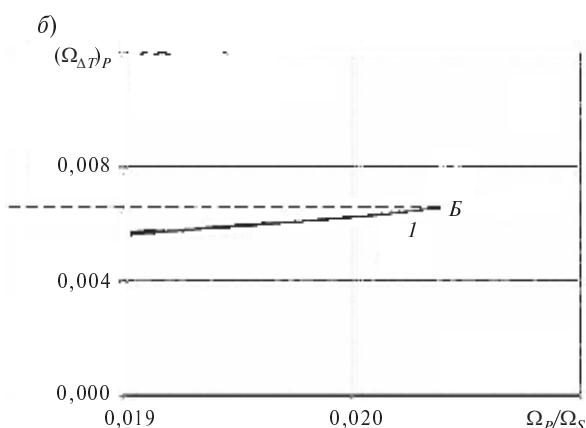
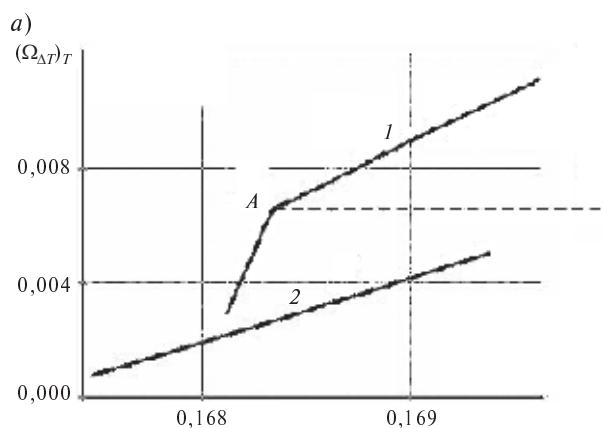


Рис. 4. Критериальные зависимости термического (а) и диффузионного (б) переохлаждения от условий теплообмена (а) и интенсивности перераспределения компонентов (б) при кристаллизации сплавов Fe-0,16 % С (1) и Al-0,3 % Cr (2)

Соотношение безразмерных переохлаждений $(\Omega_{\Delta T})_T$ и $(\Omega_{\Delta T})_P$ на рис. 4 в зависимости от заданных значений критериальных комплексов $\frac{\text{Bi Fo}}{K_L}$

и $\frac{\Omega_P}{\Omega_S}$ позволяет оценить достигаемую полноту

перитектического превращения. Пунктирная линия АБ разделяет график (рис. 4, а) для сплава Fe–C на верхнюю и нижнюю ветви. В верхней части $(\Omega_{\Delta T})_T > (\Omega_{\Delta T})_D$, т. е. перитектическое превращение происходит полностью при любой комбинации исследованных факторов. В нижней части возможны ситуации, когда при неблагоприятном сочетании критериев Ω_N , Ω_V и Ω_D достигается соотношение $(\Omega_{\Delta T})_T < (\Omega_{\Delta T})_D$, вследствие чего нарушается диффузионное условие полного протекания перитектического превращения. Поэтому для выделяющегося на фронте затвердевания L/γ избыточного углерода не обеспечивается полномасштабный перенос через оболочку γ -фазы в область δ -фазы, в связи с чем превращение $\delta \rightarrow \gamma$ происходит не в полной мере.

В исследованных условиях значения критериев термического переохлаждения $(\Omega_{\Delta T})_T$ для сплавов Al–Cr и Fe–C соизмеримы, однако величина критерия диффузионного переохлаждения $(\Omega_{\Delta T})_D$ для алюминиевого сплава не представлена на рис. 4, б, поскольку она на несколько по-

рядков превышает $(\Omega_{\Delta T})_T$ из-за весьма низкого значения коэффициента диффузии в твердой фазе ($D_C^{\gamma} \gg D_{Al}^{fcc}$), что является первопричиной полного подавления перитектических превращений в алюминиевых сплавах при формировании отливок и слитков [3].

Анализ сопряженных тепловых, кристаллизационных и диффузионных процессов при перитектическом превращении в различных сплавах демонстрирует возможность его полной или частичной реализации (вплоть до подавления) в зависимости от сочетания физико-химических параметров, вошедших в определяющие

комpleksы $\frac{\text{Bi Fo}}{K_L}$ и $\frac{\Omega_P}{\Omega_S}$. Представленные дан-

ные свидетельствуют, что кинетика и полнота перитектического превращения определяются соотношением между интегральным значением действующего диффузионного потока в слое возрастающей толщины вторичной твердой фазы, которая разделяет области первичных выделений твердой фазы и остаточного расплава, и общим количеством основного компонента, необходимого для полного протекания фазового превращения. Разработанная компьютерная модель может быть эффективно использована в качестве базы для анализа химической микронеоднородности при затвердевании отливок и слитков из перитектических сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stefanescu, D.M. Microstructure evolution during solidification of steel [Текст] / D.M. Stefanescu / / ISIJ Int.— 2006. Vol. 46, № 6.— P. 786–794.
2. Nhuinet, L. Prediction of macrosegregation during the solidification involving a peritectic transformation for multicomponent steels [Текст] / L. Nhuinet, H. Combeau // J. Mater. Sci.— 2004. Vol. 39.— P. 7213–7219.
3. Золоторевский, В.С. Металловедение литейных алюминиевых сплавов [Текст] / В.С. Золоторевский, Н.А. Белов.— М.: Изд-во МИСИС, 2005.— 376 с.
4. Shibata, H. Kinetics of peritectic reaction and transformation in Fe-C alloys [Текст] / H. Shibata [et al.] // Met. Mater. Trans.— 2000.— Vol. 31B, № 5.— P. 981–991.
5. Phelan, D. Kinetics of the peritectic phase transformation: *in-situ* measurements and phase field modeling [Текст] / D. Phelan [et al.] // Met. Mater. Trans.— 2006, Vol. 37A, № 3.— P. 985–994.
6. Ueshima, Y. Analysis of solute d/g transformation during solidification [Текст] / Ueshima Y. [et al.] // Met. Mater. Trans.— 1986. Vol. 17B, № 6.— P. 845–859.
7. Fredriksson, H. Solidification of iron-base alloys [Текст] / H. Fredriksson, J. Stjerndahl // Metal Sci.— 1982. Vol. 16.— P. 575–585.
8. St.-John, D.H. A simple prediction of the rate of the peritectic transformation [Текст] / D.H. St.-John, L.M. Hogan // Acta Metall. 1987. Vol. 35, № 1.— P. 171–174.
9. El-Bealy, M. Modeling of peritectic reaction and macrosegregation in casting of low carbon steel [Текст] / M. El-Bealy, H. Fredriksson // Met. Mater. Trans.— 1996. Vol. 27B, № 6.— P. 999–1014.
10. Голод, В.М. Моделирование и компьютерный анализ кристаллизации многокомпонентных сплавов на основе железа [Текст] / В.М. Голод, К.Д. Савельев, А.С. Басин.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 372 с.



11. Won, Y.-M. Simple model of microsegregation during solidification of steels [Текст] / Y.-M. Won, B.G. Thomas // Metall. Mater. Trans.— 2001, Vol. 32A, № 7.— Р. 1755–1767.
12. Емельянов, К.И. Анализ полноты перитектического превращения в зависимости от кинетики затвердевания железоуглеродистых сплавов [Текст] / К.И. Емельянов, В.М. Голод // XXXIX неделя науки СПбГПУ: Матер. междунауч.-практ. конф. Ч. VI.— СПб.: СПбГПУ, 2010.— С. 15–17.
13. Koseki, T. Solidification of undercooled Fe-Cr-Ni alloys. Part III. Phase selection in chill casting [Текст] / T. Koseki [et al.] // Metall. Mater. Trans.— 1997, Vol. 28A, № 11.— Р. 2385–2395.
14. Голод, В.М. Метастабильная кристаллизация двойных сплавов алюминия с переходными металлами [Текст] / В.М. Голод, П.В. Ладнов.— Сб.: Литейное производство сегодня и завтра. Труды VIII Всерос. науч.-практ. конф.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010.— С. 356–364.
15. Голод, В.М. Критериальный анализ конкурентной эвтектической кристаллизации многокомпонентных сплавов Fe-C-Si-Cr [Текст] / В.М. Голод— Научно-техн. ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование. 2009.— № 2 (78). — С. 155–162.

УДК 621.762:541.1

Н.Г. Колбасников, В.В. Мишин, И.А. Шишов,
А.В. Забродин, Ю.Е. Маркушкин

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТОЙ НАНОСТРУКТУРНОЙ БЕРИЛЛИЕВОЙ ГУБКИ

Постановка задачи. Известно, что бериллий обладает некоторыми замечательными свойствами, в том числе высокими упругими характеристиками и способностью пропускать рентгеновское излучение самого широкого спектра [1]. Это делает его исключительно привлекательным для использования в рентгеновской технике, где он нашел применение в виде фольги. Снижение толщины бериллиевой фольги и повышение чистоты ее химического состава обеспечивают значительный выигрыш в эффективности ее использования. Однако для технологий изготовления бериллиевых фольг трудности создают исключительная хрупкость, токсичность и химическая активность металла, которая приводит к сложности его очистки от примесных элементов, в первую очередь от кислорода, а также способствует разрушению на первых стадиях пластической деформации.

Для повышения деформируемости бериллия применяют метод горячей прокатки в чехлах из мягкой углеродистой или нержавеющей стали [1]. Для получения тонкой фольги используют метод химического фрезерования (полирования), теплую прокатку, а для холодной неразрушающей прокатки применяют специальные схемы напряженно-деформированного состояния. Тех-

нологические сложности получения высококачественной бериллиевой фольги (тонкой, сверхчистой по металлическим примесям, вакуумноплотной, с высоким качеством поверхности) обусловливают баснословные цены на этот вид металлопродукции.

Считается, что одной из мер по снижению хрупкости металлов и повышению их прочностных характеристик служит уменьшение размера зерна [2–4]. Развитие и освоение технологий изготовления нанокристаллических материалов может стать одним из прорывных направлений в технологиях получения и обработки бериллия. Разработка новой гидридной технологии изготовления сверхчистого высокопористого нанокристаллического бериллия [5] может внести коррективы в соотношение сил на международном бериллиевом рынке, изменить существующие технологии изготовления тонких и тончайших фольг для аналитического и специального приборостроения. Структура бериллиевой губки, имеющей пористость до 95 %, представлена на рис. 1.

С использованием гидридной технологии был получен высокопористый бериллий с микроячеистой структурой, чистота которого может достигать 99,98 % без учета содержания кисло-

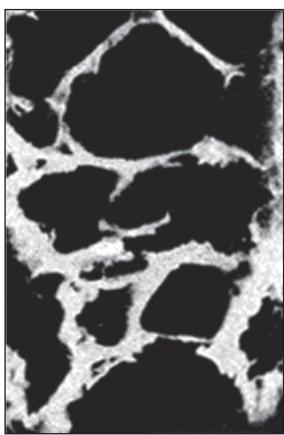


Рис. 1. Микроструктура высокопористого берилля, $\times 5000$

рода. По данным нейтроноактивационного анализа содержание кислорода, вносимого в основном с исходным порошком металла, составляет 0,3–1,5 масс. %. Химический состав нанокристаллического берилля, полученного по гидридной технологии, следующий:

Элементы	Содержание присоединенных атомов, ppm
Li	0,03
Mg	2
Al	4
K	4
Ca	40
V	2
Cr	2
Mn	2,5
Fe	45
Co	0,1

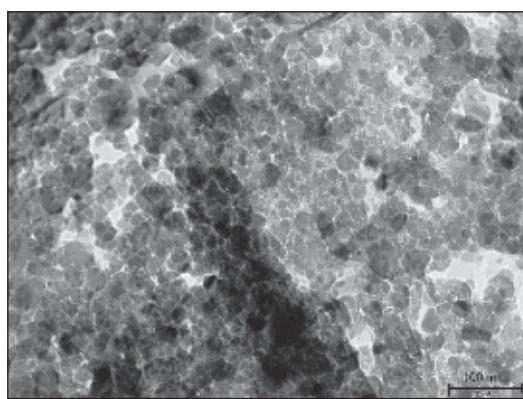


Рис. 2. Микроструктура нанокристаллического берилля ($\times 100\ 000$)

Ti	0,1
Ba	0,4
Cu	1,5
Ni	1,7

Высокопористую бериллиевую губку, полученную гидридным способом, прессуют в вакууме при повышенных температурах и после этого получают практически беспористый берилль, который имеет микроструктуру, представленную на рис. 2. Как видно по рис. 2, средний размер зерна спрессованной заготовки составляет 20–30 нм. Таким образом, нанокристаллический берилль, который согласно общепринятым представлениям должен иметь не только высокий предел текучести, но высокое сопротивление разрушению, может быть использован в качестве исходной заготовки для производства тонкой и тончайшей фольги. Однако при горячей прокатке, а затем при холодной прокатке фольги из спрессованного нанокристаллического берилля было обнаружено, что исходная заготовка имеет форму двояковогнутой линзы, которая не меняется даже при горячей прокатке в оболочке из мягкой стали. Подобная форма заготовки приводит к неравномерности деформации при холодной прокатке и вызывает преждевременное разрушение как при извлечении горячекатаного металла из чехлов, так и при холодной прокатке.

В задачи работы входило исследование причин возникновения формы двояковогнутой линзы при прессовании высокопористой заготовки сверхчистого нанокристаллического берилля, разработка мероприятий по выравниванию деформаций во время осадки высокопористой заготовки, а также исследование структуры прессовки, которая служит заготовкой для дальнейшей горячей прокатки в оболочках и холодной прокатки фольги.

Исходные данные для расчета. Задачу об осадке и прессовании в закрытую матрицу высокопористой заготовки, размещенной в контейнере из мягкой стали, решали методом конечных элементов при помощи программы MultiDef, разработанной на кафедре пластической обработки СПбГПУ. Для анализа процесса была построена сетка конечных элементов, состоящая из 981 узла и 300 элементов, которая показана на рис. 3. Для уменьшения объема вычислений с учетом осевой симметрии заготовки представлена только правая половина продольного сечения. Показана оболочка из стали (1) и высокопористый



бериллий (2). Геометрические параметры оболочки и пористого тела, принятые при моделировании, соответствуют реальным параметрам при прессовании.

Модель материала оболочки — упругопластическое упрочняющееся тело. Температура прессования в расчетах принята равной 700 °С.

Свойства материалов заданы следующим образом:

материал оболочки (сталь-20) считается компактным, его свойства заданы коэффициентом Пуассона $v = 0,3$, модулем упругости $E = 167$ ГПа, пределом текучести в зависимости от накопленной интенсивности пластических деформаций (рис. 4);

исходный нанокристаллический бериллий считается пористым телом, перед прессованием его пористость составляет 90 %;

механические свойства высокопористого бериллия заданы пределами текучести на гидростатическое сжатие p_s и на сдвиг τ_s в зависимости от относительной плотности; согласно данным [6] для компактного бериллия при температуре 700 °С приняты модуль упругости $E = 250$ ГПа, коэффициент Пуассона $v = 0,02$.

В модели принято, что пористость бериллия в исходном состоянии распределена равномерно по объему и его начальная плотность $\rho = \text{const} = 0,1$, что составляет $0,1845 \text{ г}/\text{см}^3$.

Границные условия заданы в перемещениях (по осях закреплены узлы, лежащие на оси симметрии) и в напряжениях (на боковой контактной поверхности действуют силы трения T , заданные с учетом коэффициента трения $f = 0,01$ (при прессовании применяется графитовая смазка)).

При решении задачи прослеживается процесс прессования заготовки от исходной высоты $h_0 = 60$ мм до конечной $h = 6,0$ мм за 32 шага нагружения. Толщина оболочки, в которую помещен высокопористый бериллий, составляет 1,5 мм, диаметр исходной заготовки 20 мм. На каждом этапе нагружения задавали перемещение пуансона от 0,5 до 1,7 мм. Результаты решения задачи о прессовании в оболочке представлены в виде областей равных уровней основных параметров, характеризующих процесс деформирования.

Изменение плотности прессуемого бериллия. По результатам решения задачи видно (рис. 5), что на первых этапах прессования уплотнение происходит слабо. Распределение плотности по

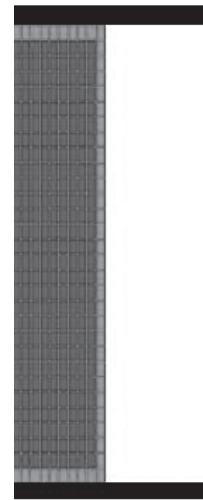


Рис. 3. Исходная сетка конечных элементов

сечению заготовки неравномерное, в центральной области плотность заготовки на 10–15 % меньше плотности участка с максимальными интенсивностями деформации.

По мере увеличения степени деформации относительная плотность бериллия растет и выравнивается по объему, достигая на заключительных стадиях прессования значений 0,76–0,82. При этом разнотолщинность заготовки практически отсутствует.

Формоизменение заготовки. Вследствие высокого начального очага деформации тонкая компактная оболочка высокопористого бериллия теряет устойчивость на первых стадиях деформации, образуется двойная бочка, которая по мере увеличения степени деформации становится

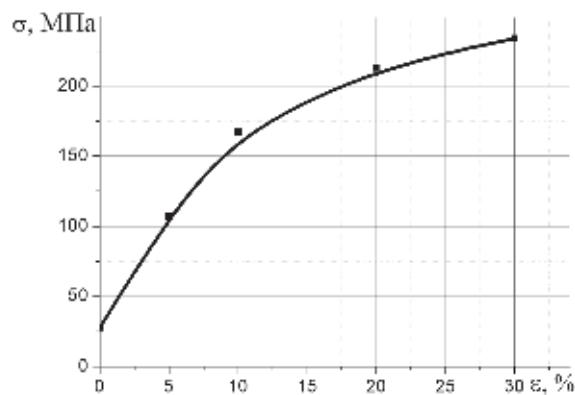


Рис. 4. Зависимость сопротивления деформации стали-20 при $T = 700$ °С, принятая для выполнения расчета

Зависимости для высокопористого берилля предела текучести на гидростатическое сжатие p_s и на сдвиг τ_s от относительной плотности

Относительная плотность	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,97
p_s , МПа	10	12	16	28	40	60	84	100
τ_s , МПа	8,88	10,56	12,48	14,4	16,8	19,2	21,6	22,8

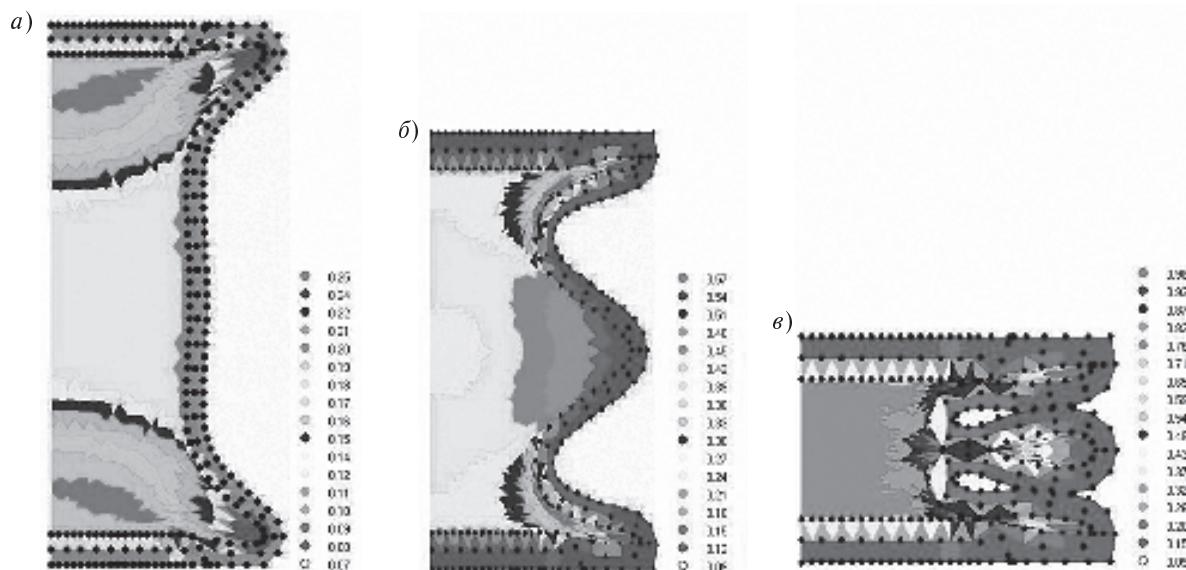


Рис. 5. Распределение плотности прессуемого берилля в зависимости от степени деформации: *a* — 40 %; *б* — 60 %; *в* — 80 %

все более выраженной. На последних этапах нагрузки двойная бочка смыкается по внешнему контуру (рис. 5, *в*).

На рис. 6 представлена фотография заготовки берилля на одной из финальных стадий прессования после осадки на 80 % от исходной высоты. Как видно, форма бериллиевой заготовки, полученная при моделировании (рис. 5, *в*), практи-

тически идентична представленной форме реальной прессовки. Совпадают не только форма заготовки, но и отсутствие разнотолщинности в областях, прилегающих к оболочке.

Для сравнения и уточнения характера деформации при прессовании других пористых материалов в оболочке была выполнена осадка медного порошка в медной оболочке. Геометрические соотношения прессуемого материала и оболочки были выбраны аналогично параметрам осадки высокопористого берилля. Медный порошок после наполнения капсулы имел относительную плотность утряски $\rho \approx 0,1$, как и в случае прессования берилля.

В процессе нагружения медной капсулы уже на первых этапах происходит потеря устойчивости трубки и образуются двойные складки во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 7, *а*). Это принципиально отличается от осадки высокопористого берилля, что, очевидно, связано с низкой начальной плотностью и текучестью медного порошка, из-за чего процесс осад-



Рис. 6. Заготовка нанокристаллического берилля, полученная после осадки на 80 %

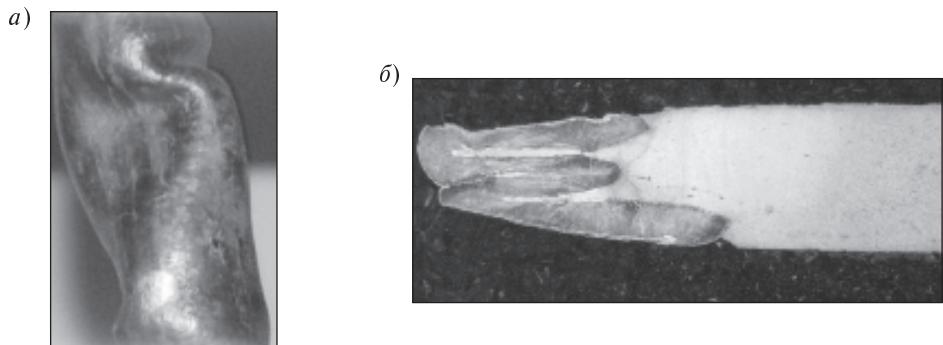


Рис. 7. Потеря устойчивости медной оболочки с медным порошком (а) и характер распределения прессуемого порошка после компактирования (б)

ки подобен осадке пустотелой трубы. Напротив, высокопористая бериллиевая губка выступает в роли достаточно жесткого стержня, который придает поперечную «жесткость» всей капсуле.

Расчеты с использованием конечноэлементной модели пористого тела после степени деформации 80 % сталкиваются с трудностями, связанными с искажениями сетки конечных элементов. Для анализа последних стадий прессования заготовки сетка конечных элементов была перестройена и упрощена (рис. 8, а, б) при сохранении всех геометрических размеров прессовки и напряженно-деформированного состояния.

Темным цветом указан уплотненный на первой стадии прессования бериллий, относительная плотность которого после осадки на 80 % от исходной высоты составляет 0,8. После нескольких этапов последующей деформации относительная плотность бериллия становится равной 0,97–0,99, вследствие чего материал в модели можно принять компактным.

Границные условия заданы аналогично первым стадиям прессования. С использованием

данной модели рассчитано 11 этапов нагружения от высоты заготовки $h_0 = 10,6$ мм до $h = 6,0$ мм, перемещения пуансона составляли 0,5–1,3 мм. Формоизменение заготовки показано на рис. 9

Видно, что уже с первых этапов нагружения появляется разнотолщинность бериллиевого слоя. Бериллий становится практически компактным и начинает за счет более высокой прочности и модуля упругости продавливать менее прочную оболочку. К концу прессования толщина бериллиевой прослойки составляет по центру $h_1 = 2,29$ мм, по краю $h_2 = 2,86$ мм, а разнотолщинность — 0,57 мм.

Таким образом, расчеты показали, что материал оболочки (сталь-20), используемой для прессования высокопористого нанокристаллического бериллия, обладает недостаточно высокими прочностными и упругими свойствами, а полученная форма бериллиевой заготовки малопригодна для дальнейшей горячей прокатки вследствие разнотолщинности, которая вызывает неравномерность деформации (рис. 10) и преждевременное разрушение фольги.

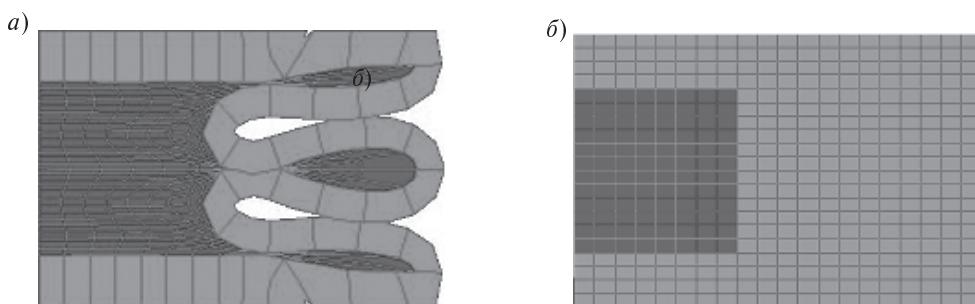


Рис. 8. Сетка конечных элементов после дополнительной перестройки:
а — до перестройки сетки; б — после перестройки

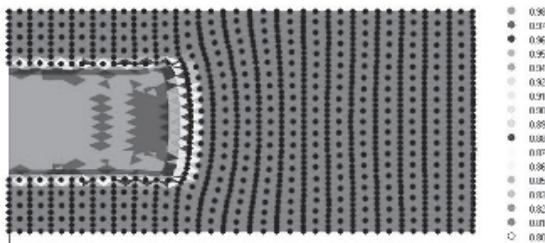


Рис. 9. Распределение относительной плотности берилля на заключительных этапах компактирования

Для устранения разнотолщинности прессовки были выполнены расчеты формоизменения заготовки на последних стадиях осадки для более высоких упругих свойств материала оболочки (модули упругости 200, 300, 400 ГПа), а также для более высоких пределов текучести. Расчеты показали, что, используя в качестве оболочки высокомодульный металл (вольфрам или молибден, или металл со значительно более высоким пределом текучести, например на 300 МПа выше, чем у стали-20), можно получить заготовку в форме диска практически без разнотолщинности (рис. 11).

Сплошность спрессованной заготовки. Полученные заготовки из сверхчистого нанокристал-

лического берилля были прокатаны в горячем состоянии в оболочке из мягкой стали, а затем в холодном состоянии. Была изучена структура и отмечены признаки расслоения заготовки в результате холодной прокатки (рис. 12, а). Подобный вид начальных стадий разрушения свидетельствует о том, что, подготавливая заготовки под прокатку, не обеспечили условия полной консолидации материала. Диффузионные процессы, приводящие обычно при спекании к формированию монолитной бесспористой структуры, при температуре прессования протекали недостаточно интенсивно. Консолидации частиц могут препятствовать и неметаллические наноразмерные частицы, предположительно гидрооксиды берилля, расположенные по границам стенок бериллиевой губки (см. рис. 1). На рис. 12, б представлен участок поверхности межзеренного разрушения и след от выкрошенного зерна размером около 1 мкм, поверхность которого покрыта неметаллическими включениями размером 20–30 нм.

Если считать, что для соединения частиц берилля (сварка давлением) при прессовании необходимо образование новой межзеренной границы с удельной энергией $\gamma'_s \approx 0,8\gamma_s$, то для описания условий консолидации можно вос-

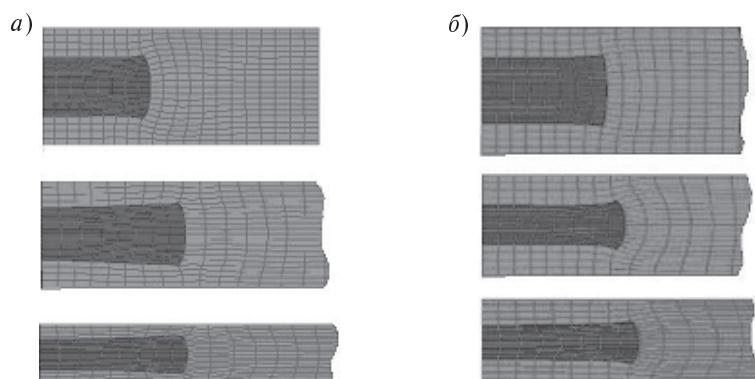


Рис. 10. Формоизменение заготовки берилля на заключительных этапах прессования при модуле упругости оболочки $E = 167$ ГПа (а) и $E = 200$ ГПа (б)



Рис. 11. Конечная форма прессованной заготовки из нанокристаллического берилля после прессования в оболочке с модулем упругости 400 ГПа

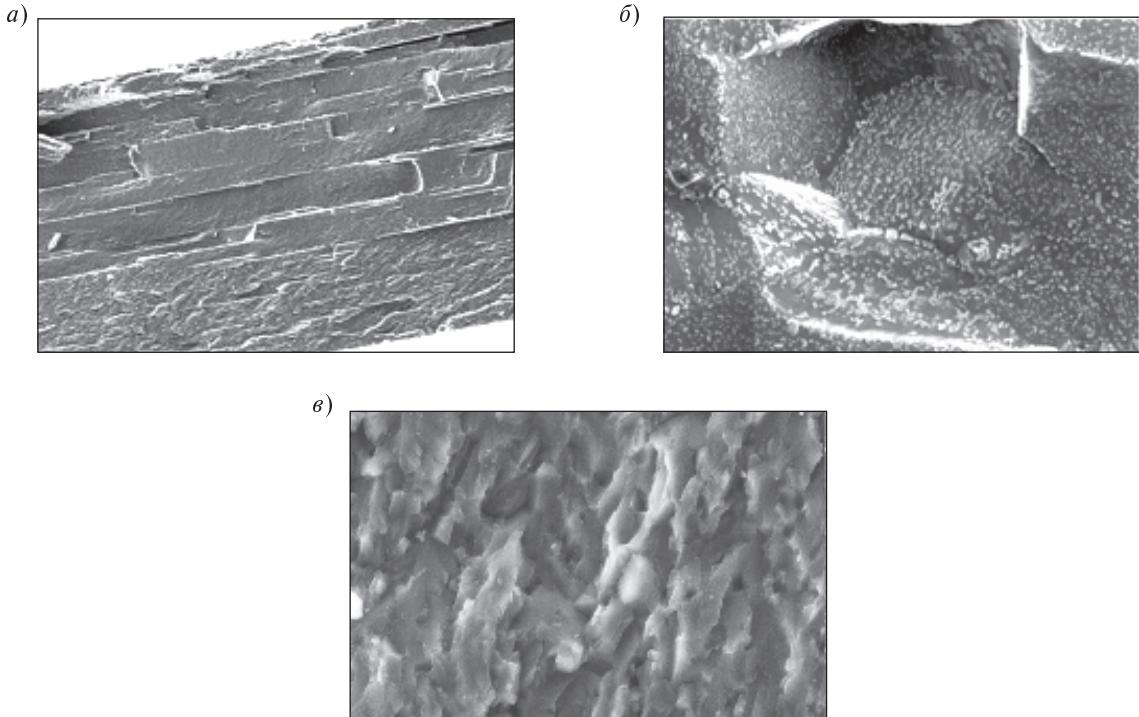


Рис. 12. Структура берилля: *а* — после холодной прокатки с суммарным обжатием $\varepsilon = 12\%$; *б* — неметаллические включения на поверхности раздела частиц берилля; *в* — структура берилля после горячей прокатки при $870\text{ }^{\circ}\text{C}$

пользоваться критерием соединения, предложенным в [7]:

$$\sigma_y \geq \frac{\Delta\gamma_s}{2a_{rp}} = \frac{(2\gamma_s - \gamma'_s)}{6a_{rp}}, \quad (1)$$

где σ_y — сжимающие нормальные напряжения; a_{rp} — среднее межатомное расстояние на вновь образованной межзеренной или межфазной границе; γ'_s — удельная энергия этой границы; γ_s — удельная поверхностная энергия; $\Delta\gamma_s$ — изменение поверхностной энергии при соединении.

При выполнении соотношения между поверхностной энергией и модулем упругости в виде

$$\gamma_s = \frac{Ea}{8\pi(1-\nu)}, \quad (2)$$

где ν — коэффициент Пуассона, выражение (1) сводится к виду

$$\sigma_y \geq 1750 \text{ МПа}$$

при $E = 250000 \text{ МПа}$, $\nu = 0,02$.

Как показывают расчеты, во время прессования на последней стадии уплотнения пористой бериллиевой заготовки напряжения σ_y до-

стигают значения 1450 МПа, что недостаточно для получения монолитного материала.

Создание условий для повышения напряжений σ_y за счет изменения схемы напряженно-деформированного состояния путем ограничения горизонтального перемещения осаживаемой заготовки в закрытой матрице привели к ликвидации несплошностей и отсутствию расслоения при прокатке.

Отметим, что прессование высокопористого гидридного исходно нанокристаллического берилля при $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ для получения сплошной заготовки, а также многократная горячая прокатка при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ привели к росту зерна. На рис. 12, *в* видно, что средний размер зерна горячекатаного берилля составляет 1–2 мкм.

Выводы

Разнотолщинность прессуемой заготовки высокопористого нанокристаллического берилля возникает на последних этапах прессования из-за относительно низких упругих свойств материала оболочки (сталь-20), которую начинает продавливать уплотненный берилль.

Потеря устойчивости пластической деформации оболочки в процессе прессования высокопористой нанокристаллической бериллиевой губки и порошковой меди как в эксперименте, так и при моделировании принципиально отличаются; за счет высокой жесткости и прочности бериллиевая губка препятствует потере устойчивости деформации в поперечном направлении.

Для снижения величины разнотолщинности и полного ее устранения необходимо использо-

вать материалы оболочки с высоким модулем упругости и пределом прочности.

Для повышения качества прессовки нанокристаллической бериллиевой губки и устранения расслоения заготовки при последующей прокатке необходимо достигать максимальных напряжений сжатия не менее 1750 МПа при температуре 700 °С и предохранять внутренние поверхности губки от образования гидрооксидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бериллий / Под ред. Д. Уайта, Дж. Берка. Пер. с англ. под ред. М.Б. Рейфмана.— М.: Издательство иностранной литературы, 1960.— 616 с.
2. Бериллий. Наука и технология / Под ред. Д. Вебстера; Пер. с англ. под ред. Г.Ф. Тихинского и И.И. Папирова.— М.: Металлургия, 1984.— 624 с.
3. Кайбышев, О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев; Отв. ред. О.А. Банных.— М.: Наука, 2002.— 438 с.
4. Папиров, И.И. Получение и свойства мелкозернистого бериллия [Текст] / И.И. Папиров, И.А. Тараненко, Г.Ф. Тихинский // Атомная энергия.— 1974. Т. 37, вып. 3.— С. 220–223.
5. Костылев, Ф.А. Получение и свойства высокопористого бериллия с микроячеистой структурой [Текст] / Ф.А. Костылев, В.В. Горлевский, М.Д. Сенин [и др.] // Неорганические материалы.— 1995. Т. 31, № 4.— С. 479–482.
6. Beaver, W.W. Mechanical properties of the beryllium received by methods of powder metallurgy [Текст] / W.W. Beaver, K.G. Wikle // J. Metals.— 1954. № 5. Р. 559–573.
7. Колбасников, Н.Г. Энтропия. Структура. Фазовые превращения и свойства металлов [Текст] / Н.Г. Колбасников, С.Ю. Кондратьев.— СПб.: Наука, 2006.— 360 с.

УДК 621.039.53:669.14

О.Ю. Ганзуленко, Н.Б. Кириллов,
А.П. Петкова, М.В. Яковицкая

ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

Проблема создания аустенитных коррозионно-стойких свариваемых сталей для изготовления тонкостенных конструкций высокотемпературных технологических систем атомной и водородной энергетики, подвергающихся длительному воздействию различных хлорсодержащих и водородосодержащих сред, по-прежнему актуальна.

Основным недостатком стабилизированных аустенитных хромоникелевых сталей типа 18–8 и подобных композиций является их склонность

к снижению водородостойкости и преждевременной потере герметичности тонкостенных сварных конструкций высокотемпературных технологических систем атомной и водородной энергетики, обусловленная структурной неоднородностью (скопления, строчечность) и низкой сцепляемостью титансодержащих фаз внедрения с матрицией.

Недостатками известных отечественных и зарубежных нестабилизированных коррозионностойких хромоникелевых сталей типа 18–10,



18–12 являются отсутствие требуемого уровня и стабильности основных физико-механических свойств, низкая радиационная, коррозионная и водородостойкость при температурах эксплуатации реакторного оборудования.

Содержание в известных сталях ряда легирующих и примесных элементов, во многом определяющих требуемое структурное состояние металла и уровень его важнейших служебных характеристик, не контролируется и находится в весьма широких концентрационных пределах.

Химический состав предлагаемой стали и известных аналогов

Предлагаемая сталь отличается от известных аналогов тем, что в ее состав, кроме углерода, кремния, марганца, хрома, никеля, титана, серы, фосфора и железа, дополнительно введены алюминий, иттрий, кальций и азот при следующем соотношении компонентов (в массовых долях %), приведенном в табл. 1 [1].

При этом введение в предлагаемой стали ограничений на суммарное содержание таких элементов, как алюминий и кремний, углерод и азот, сера и фосфор, концентрация которых в известных аналогах не контролируется и находится в весьма широких пределах, обуславливает стабильность ее эксплуатационных свойств и повышение водородостойкости по сравнению с ближайшими аналогами типа 18–8 и 18–13 [1].

Соотношение указанных легирующих и примесных элементов выбрано таким, чтобы предлагаемая сталь обеспечивала улучшенный комплекс основных физико-механических свойств (табл. 2), а также низкий уровень водо-

родопроницаемости по сравнению с известными аналогами.

Модифицирование стали азотом в указанном соотношении с углеродом и титаном существенно улучшает структурную стабильность металла шва и зоны термического влияния, способствует формированию в достаточном количестве при соответствующей термообработке мелкодисперсных карбидных и нитридных фаз, термодинамически устойчивых при температурах технологических и сварочных нагревов, что обеспечивает снижение структурной неоднородности в металле и повышает энергию активации диффузионных процессов атомов водорода, т. е. уменьшает его термодинамическую активность в γ -железе [1].

Введение в заявляемую сталь микролегирующих и модифицирующих добавок алюминия, иттрия и кальция в указанном соотношении с хромом, никелем и кремнием повышает ее структурную стабильность при рабочих температурах и, как следствие, весь комплекс основных физико-механических и служебных свойств. При этом происходит более равномерное распределение легирующих элементов и неметаллических включений по всему сечению слитка, поковок, металл эффективнее очищается от вредных примесей и газов, тоньше и чище становятся границы зерен, увеличивается прочность межкристаллитной связи [1].

Механические и технологические характеристики предлагаемой стали

В табл. 2 приводятся основные механические и технологические характеристики всех трех составов предлагаемой стали и ее ближайшего

Таблица 1
Химический состав исследованных сталей

Сортамент	№ п/п	Соединения элементов, масс. %																	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Nb	Mo	Al	Y	Ca	N	S	P	Al + Si	C+N	S+P	Fe
01Х17Н12Т4	1	0,005	0,2	0,1	17,0	12,0	0,08	—	—	0,5	0,05	0,001	0,01	0,005	0,02	0,7	0,015	0,025	剩.
01Х18Н13Т4	2	0,01	0,4	0,3	18,0	13,0	0,2	—	—	0,1	0,08	0,003	0,008	0,010	0,03	0,5	0,018	0,04	剩.
02Х19Н14Т4	3	0,015	0,5	0,5	19,0	14,0	0,3	—	—	0,3	0,1	0,005	0,01	0,015	0,005	0,8	0,025	0,02	剩.
03Х18Н13	4	0,03	0,35	0,4	17,5	13,0	0,005	—	—	—	—	—	—	0,020	0,030	—	—	0,05	剩.
03Х16Н15М3Н	5	0,040	0,25	0,2	16,0	15,2	—	0,46	3,7	0,01	—	—	0,02	0,005	0,006	—	0,06	0,011	剩.
06Х18Н10Т	6	0,06	0,7	1,6	18,0	9,8	0,6	—	—	0,02	—	—	0,02	0,020	0,030	—	—	0,05	剩.
03Х20Н35М4Н	7	0,020	0,3	0,5	21,9	34,6	—	0,8	3,6	—	—	—	—	0,008	0,007	—	—	0,015	剩.
03Х20Н45М4Н	8	0,020	0,4	0,6	20,0	44,0	—	1,03	3,8	0,02	—	—	0,02	0,011	0,010	—	0,04	0,021	剩.

Таблица 2

**Механические и технологические характеристики предлагаемой стали
и ее ближайшего аналога**

Состав	Механические характеристики при 20 °C				Низкая твердость при производстве тонко- листового рулонного проката, %
	σ_{B} , Mpa	$\sigma_{0,2}$, Mpa	δ , %	U , %	
01Х17Н12ГЧ-НИ	510	190	50	75	85
01Х18Н13ГЧ-НИ	530	200	46	75	85
02Х19Н14ГЧ-НИ	550	220	45	70	90
03Х18Н13	450	180	40	65	78

аналога. Отсутствие скоплений и дисперсность карбидов и карбонитридов оказывает благоприятное влияние на прочностные и пластические свойства предлагаемых аустенитных сталей по сравнению с нестабилизированным аналогом. С увеличением количества иттрия и кальция в предлагаемой стали снижается склонность к структурной анизотропии и улучшается технологичность на стадии металлургического передела по сравнению с ближайшим аналогом, что повышает выход годного при промышленном производстве тонколистового и трубного проката (см. табл. 2), а также других полуфабрикатов для изготовления сложнопрофильных газовых емкостей и сосудов.

**Исследование водородопроницаемости
и оценка работоспособности
аустенитных сталей и сплавов
в водородосодержащих средах¹**

Определение влияния различных легирующих и примесных элементов на высокотемпературную проницаемость водорода проводилось на аустенитных сталях и сплавах, химический состав которых приведен в табл. 1.

Исследования высокотемпературной проницаемости водорода сквозь рассматриваемые материалы проводились объемно-метрическим методом на образцах, выполненных в виде плоской мембранны размерами $Ж \times 1$ мм, сваренной аргонодуговой или электронно-лучевой сваркой в трубчатые держатели из стали марки 08Х18Н10Т.

¹ По результатам поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы

Водородопроницаемость измерялась в интервале рабочих температур 300–700 °C и при давлении водорода со стороны входа 1 атм. Величина удельной проницаемости водорода P , приведенная к толщине образца 1 мм и его площади 1 см² за единицу времени (1 с) при давлении водорода в 1 атм, имеет размерность [см³·мм/(см²·с·атм^{0,5})]. В работе использовался технический водород марки А (ГОСТ 3022–80), содержащий менее 0,1 % примесей азота и кислорода.

Существенное влияние на процесс и параметры проницаемости водорода сквозь аустенитные хромоникелевые стали оказывает их химический и фазовый состав, в частности содержание в твердом растворе хрома, никеля и примесных элементов [2–4].

Анализ концентрационных зависимостей проницаемости водорода сквозь аустенитные хромоникелевые стали (рис. 1) позволил установить, что увеличение в исследуемых сталях содержания хрома до 15–20 % в несколько раз снижает скорость проникновения водорода по сравнению с низколегированным γ -железом, а дальнейшее его увеличение в твердом растворе практически не изменяет уровня газопроницаемости [3]. Введение модифицирующих добавок алюминия (рис. 2) снижает водородопроницаемость аустенитных сталей [3]. При комплексном введении в сталь хрома, никеля и различных микролегирующих добавок водородопроницаемость аустенитных сталей снижается на 1–1,5 порядка по сравнению с проницаемостью для низколегированного γ -железа [3].

Характер влияния хрома и никеля на проникновение и диффузию водорода в аустените при его легировании обусловлен изменением межатомных сил взаимодействия и искажением пе-

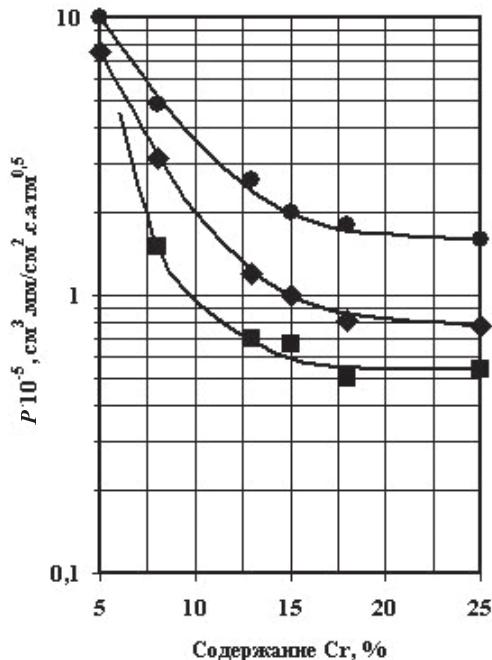


Рис. 1. Влияние содержания хрома в хромоникелевом аустените на водородопроницаемость различных композиций при повышенных температурах:
● — 700 °C; ◆ — 600 °C; ■ — 500 °C

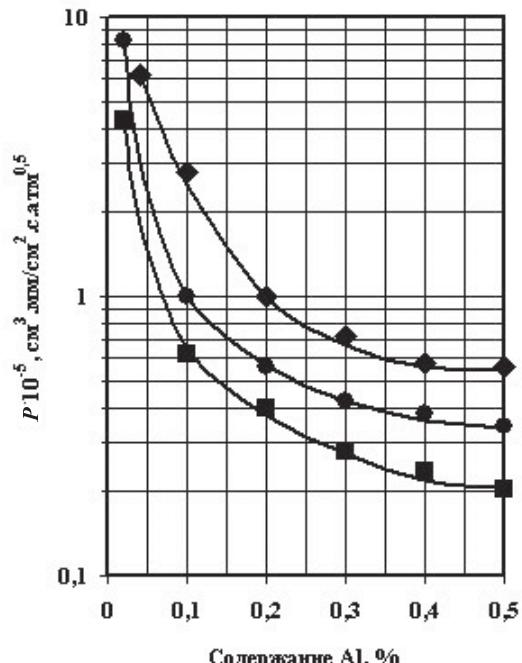


Рис. 2. Влияние содержания алюминия на водородопроницаемость аустенитных хромоникелевых сталей различных композиций при температуре 600 °C:
◆ — сталь марки 10Х18Н10Т;
● — сталь марки 03Х21Н32М3Б;
■ — сплав марки 03Х20Н45М4Б

риодичности кристаллической решетки [5]. Полученные данные показывают достаточно хорошую корреляцию между параметрами процесса водородопроницаемости и изменением сил межатомной связи в хромоникелевом аустените, а также свидетельствуют о влиянии характера электростатических сил взаимодействия в кристаллической решетке на диффузионную подвижность водорода.

На рис. 3 представлены температурные зависимости водородопроницаемости исследуемых хромоникелевых сталей. Результаты обработки экспериментальных данных показывают, что проницаемость водорода сквозь исследованные материалы возрастает с повышением температуры по экспоненциальному закону $P = P_0 \exp(-E/RT)$, где P — водородопроницаемость материала, $\text{см}^3 \cdot \text{мм}/\text{см}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{атм}^{0.5}$; P_0 — предэкспоненциальный множитель, зависящий от материала, $\text{см}^3 \cdot \text{мм}/\text{см}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{атм}^{0.5}$; E — энергия активации процесса водородопроницаемости, ккал/г·атом; T — абсолютная температура, К; R — универсальная газовая постоянная, кал/г·атом·К.

Анализ температурных зависимостей водородопроницаемости рассматриваемых материалов показал, что водородопроницаемость высоколегированных сталей типа 20–35 и 20–45 в 1,5–2 раза ниже, чем сталей типа 18–10. При замещении атомов железа элементами Cr, Ni существенно снижается диффузионная подвижность водорода в γ-железе и уменьшается скорость его проникновения, что объясняется изменением электронного состояния системы металл–водород. При этом значение энергии активации E в экспоненциальном выражении температурной зависимости водородопроницаемости $P = P_0 \exp(-E/RT)$, характеризующее величину энергетического барьера при диффузионном перемещении атомов водорода по междуузлям кристаллической решетки, заметно возрастает и может достигать 15,0 ккал/г·атом (табл. 3). С увеличением степени легированности стали для совершения элементарного акта диффузии атома водорода необходима несколько более высокая флукутация энергии.

Снижение количества никеля в разработанной стали может быть скомпенсировано регули-

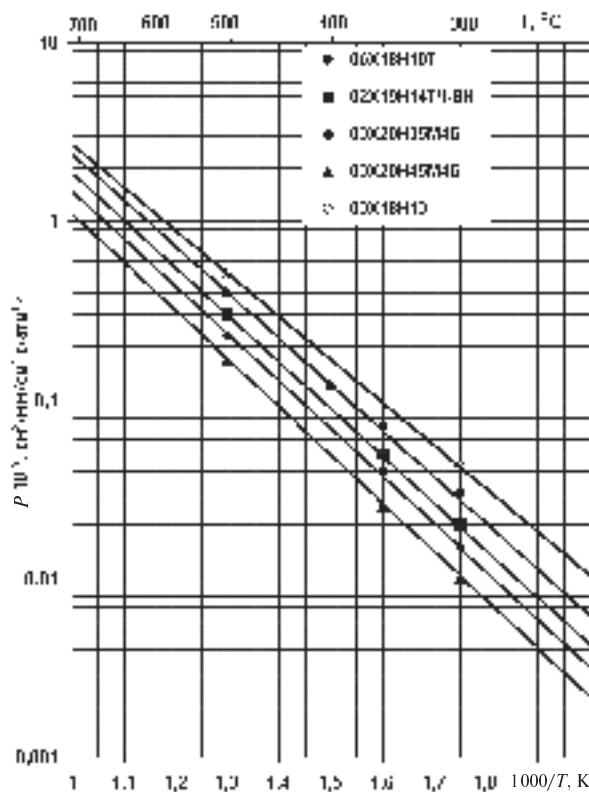


Рис. 3. Температурная зависимость водородопроницаемости (водород технической чистоты) для аустенитных сталей и сплавов различных композиций

рованием количества примесей, в первую очередь Al и N. В соответствии с рис. 2 оптимальное количество алюминия должно составлять 0,3–0,5 % (составы 1 и 3). С другой стороны, ограничение в предлагаемой стали содержания таких примесей, как кремния и алюминия ($\text{Si} + \text{Al} \leq 0,8\%$), серы и фосфора ($\text{S} + \text{P} \leq 0,04\%$) обеспечивает

уменьшение коэффициента диффузии и предельной растворимости водорода. При этом значение энергии активации E в экспоненциальном выражении температурной зависимости водородопроницаемости $P = P_0 \exp(-E/RT)$ повышает-
ся, а водородопроницаемость P снижается.

Анализ полученных данных о влиянии различного содержания примесей внедрения, в том числе углерода и азота, на водородопроницаемость исследуемых материалов показал, что с повышением содержания этих элементов имеет место увеличение коэффициента диффузии и предельной растворимости водорода. При этом значение энергии активации E в экспоненциальном выражении температурной зависимости водородопроницаемости $P = P_0 \exp(-E/RT)$ снижается [3].

Поэтому в разработанной стали содержание С и N ограничивается минимальными значениями, которые обеспечивают принятый способ выплавки и чистота применяемых шихтовых материалов ($\text{C} + \text{N} \leq 0,025\%$).

Введение в аустенитные стали редкоземельных элементов и иттрия благодаря рафинирующим механизмам воздействия на твердый раствор изменяет энергетическое состояние границ зерна и повышает эффективность очищения их от вредных примесей и газов, способствуя снижению искаженности кристаллической решетки в приграничных областях и уменьшению удельного вклада граничной диффузии атомов водорода в общую картину диффузионного процесса [5, 6].

Введение в предлагаемую сталь микролегирующих и модифицирующих добавок иттрия и кальция как элементов с высокими термодинамическими и особыми физико-химическими свойствами улучшает ее структурную стабиль-

Таблица 3

Константы проницаемости водорода технической чистоты сквозь хромоникелевые аустенитные стали в экспоненциальном выражении для температурного интервала 300–700 °С

Марка стали	$F_0 \cdot 10^{-5}$, $\text{см}^3 \cdot \text{мкв}/\text{см}^2 \cdot \text{сатч}^{0,5}$	F , $\text{мкА}/(\text{см}^2 \cdot \text{сатч})$	$F_{300\text{°C}} \cdot 10^{-5}$, $\text{см}^3 \cdot \text{мкв}/\text{см}^2 \cdot \text{сатч}^{0,5}$
06Х18Н10Т	3,2	14,8	0,028
01Х19Н14Т1-ВН	2,5	15,1	0,020
03Х20Н35М4Н	2,0	15,3	0,015
03Х20Н45М4Н	1,5	15,5	0,010
03Х18Н13	3,6	13,8	0,042



ность при рабочих температурах, снижает диффузионную подвижность атомов водорода в кристаллической решетке предлагаемой стали и ее водородопроницаемость.

Анализ данных о диффузионной подвижности и растворимости водорода в исследуемых материалах показал, что при переходе от низколегированного аустенита к сложнолегированным композициям снижению водородопроницаемости соответствует уменьшение значений коэффициентов диффузии и растворимости [3]. При этом энергия активации диффузии водорода E в кристаллической решетке металла заметно возрастает. Сбалансированное введение в твердый раствор упрочняющих добавок молибдена, титана, ниобия и других элементов способствует дальнейшему снижению диффузионной подвижности водорода в металле.

Введение в предлагаемой стали в твердый раствор упрочняющих добавок титана в принятом соотношении с углеродом и азотом способствует формированию в достаточном количестве мелкодисперсных карбидных и нитридных фаз, термодинамически устойчивых при температурах технологических и сварочных нагревов, что обеспечивает снижение структурной неоднородности в металле и повышает энергию активации E диффузионных процессов атомов водорода по сравнению с ближайшими аналогами типа 18–8 и 18–13.

Полученные интерполяционные уравнения (рис. 3) дают возможность прогнозировать проникновение водорода сквозь тонкостенные оболочки из аустенитных сталей и аналогов. Результаты работы свидетельствуют, что с помощью

оптимизации химического состава можно достаточно эффективно управлять процессом проницаемости водорода.

Предлагаемая сталь превосходит по механическим, технологическим характеристикам и водородостойкости ближайшие аналоги типа 18–8 и 18–13 и может быть рекомендована для изготовления тонкостенных конструкций высокотемпературных технологических систем атомной и водородной энергетики, подвергающихся длительному воздействию различных хлорсодержащих и водородсодержащих сред.

В результате работы:

разработан материал с улучшенными механическими и технологическими характеристиками по сравнению с аналогами;

выявлены и проанализированы концентрационные и температурные зависимости проницаемости водорода сквозь предлагаемую сталь и аналоги;

получена математическая модель зависимости водородопроницаемости предлагаемой стали и ее аналогов в интервале температур 300–700 °C для прогнозирования утечки водорода через тонкостенные оболочки;

на основании сравнительного анализа основных эксплуатационных и технологических характеристик предлагаемой стали и существующих аналогов даются рекомендации по ее применению для изготовления тонкостенных конструкций высокотемпературных технологических систем атомной и водородной энергетики, подвергающихся длительному воздействию различных хлорсодержащих и водородсодержащих сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ганзуленко, О.Ю. Повышение ресурса и надежности тонкостенных конструкций внутриворотных систем реакторных установок атомной и водородной энергетики [Текст] / О.Ю. Ганзуленко, А.А. Луккен, В.Б. Звягин, А.П. Петкова, М.В. Яковицкая // Системы и процессы управления и обработки информации: Труды Международной научно-техн. конф., посвященной 80-летию вуза в 2 ч.— СЗТУ, Институт системного анализа, автоматики и управления.— Т. 1.— С. 145–155.

- Арчаков, Ю.И. Оценка водородопроницаемости радиационно-стойких сталей в области повышенных температур [Текст] / Ю.И. Арчаков, Н.Б. Сергеева, И.А. Повышев [и др.] // Матер. все-

- союз. научно-техн. конф. «Радиационное воздействие на материалы термоядерных реакторов». — Л., 1990.

- Базарас, Ж.Л. Основные принципы легирования водородостойких сталей и сплавов для энергетики и транспорта [Текст] / Ж.Л. Базарас, Ю.Б. Мацюлявичус, И.А. Повышев.— Научные труды Каунасского технологического университета: Прикладная механика 1991. № 1. — С. 197–201.

- Рыбин, В.В Физико-химические основы создания водородостойких нержавеющих сталей [Текст] / В.В. Рыбин, И.А. Повышев // Материалы XVI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, том 2.— М., 1998. Т. 2.— С. 461.

5. Петкова, А.П. Низкотемпературное радиационное охрупчивание и работоспособность аустенитных коррозионно-стойких сталей и сплавов при высоких дозах нейтронного облучения [Текст] / А.П. Петкова.— Физика и химия обработки материалов. 2002. № 4.— М.: Элиз, 2002.— С. 22–28.

6. Паршин, А.М. Структура, радиационная повреждаемость и деформационная способность аустенитных сталей и сплавов при низкотемпературном нейтронном облучении [Текст] / А.М. Паршин, А.П. Петкова.— Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2003.— № 3(33).— С. 49–55.

УДК 669.01:622.7:662.2

А.М. Пузышев, И.О. Попов

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ ЖЕЛЕЗО-ТИТАНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ УГЛЕРОДОМ КОКСА И ЖИДКИМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ

Исследование проводилось с целью создания универсальной комплексной технологии переработки рудных титаносодержащих концентратов: ТМК — титаномагнетитового (Хибинское месторождение) и ИК — ильменитового (месторождение Гремяха — Вырмес) [1]. Предлагаемая технология включает: новый разработанный газогенераторный метод селективного восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов (с использованием кокса и жидких углеводородов) [2] → выщелачивание восстановленного огарка → получение искусственного рутилового концентрата.

Механизм и макрокинетика восстановления ильменитов и титаномагнетитов с использованием в качестве восстановителя углерода кокса,monoоксида углерода, природного газа, водорода и генераторного газа фундаментально изучались в Институте металлургии имени А.А. Байкова (ИМЕТ РАН). Известны работы таких выдающихся ученых-металлургов, как академик А.А. Байков, А.А. Морозов, А.В. Руднева, В.А. Резниченко. Данные о механизме процессов восстановления обобщены в работах [3–5]. Авторы работы [6] установили, что восстановление оксидов железа, входящих в их состав, протекает по принципу Байкова путем последовательного перехода от высших оксидов к низшим: (Fe_2O_3) , $(FeO \cdot TiO_2) \rightarrow (Fe)$, $(FeO \cdot TiO_2) \rightarrow (Fe)$, (TiO_2) , т. е. сначала восстанавливается гематит, а затем ильменит. Во всех работах отмечен автокаталитический характер восстановле-

ния оксидов железа. Начальный период топохимической реакции образования металлического железа оказывает существенное влияние на степень восстановления, массовую скорость и продолжительность процесса.

В нашей работе исследовались механизмы и макрокинетика разработанного нами газогенераторного метода восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов. Метод основан на смачивании нагретых частиц концентрата жидким углеводородным топливом, компоненты которого (C_nH_m) подвергаются конверсии в результате нагрева с образованием (непосредственно в печи) активных восстановителей (H_2 , CO), участвующих совместно с углеродом кокса в восстановлении оксидов железа до металлического состояния. Высокая концентрация восстановителей в непосредственной близости с частицами концентрата за счет смачивания и обволакивания их пленкой жидких углеводородов и использование активных восстановителей (H_2 , CO) — продуктов пиролиза жидкого углеводородного топлива — позволяют развить процессы в начальный период образования частиц металлического железа, интенсифицируя процесс в целом.

Исследования проводились в системе «железо-титановый концентрат — пленка жидкого углеводородного топлива (C_nH_m) + углерод» в сравнении с фундаментально изученной системой «железо-титановый концентрат — углерод».

Реализация газогенераторного метода восстановления осуществлялась в лабораторных



условиях при разных температурах (700–1100 °C), суммарном расходе восстановителей от 5 до 35 % масс. и при массе навески от 5 до 300 г. Для изучения механизма химических реакций восстановление велось в специально созданных условиях: в герметичной кварцевой трубке, в которую помещалась лодочка с шихтой, с отводом реакционных газов через водяной затвор. При этом, с одной стороны, исключалось влияние кислорода воздуха, а с другой стороны, изучалось поведение твердого кислорода, входящего в состав сложных оксидов по непрерывно регистрируемому количеству образующегося реакционного газа. В ходе эксперимента имелась возможность с помощью электронагревательных элементов плавно изменять температуру, непрерывно регистрируемую с помощью термопары, расположенной над шихтой.

Для полноты понимания механизмов процесса восстановления и исследования поведения сложных оксидов Fe^{+2} , Fe^{+3} и TiO_2 были использованы концентраты: ИК ($n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})\text{O} \cdot \text{TiO}_2$), ТМК ($\text{Fe}(\text{Fe}^{+3}, \text{Ti})_2\text{O}_4$) и Оленегорский железорудный концентрат (ЖК) (Fe_2O_3 , FeO), содержащие в разном соотношении минералы и сложные оксиды (см. таблицу). Крупность используемых концентратов составляет: 0,04–0,16 мм у ТМК; 0,04–0,15 мм у ИК; 0,07–0,4 мм у ЖК. В качестве восстановителя использовался доменный кокс крупностью 0,1–0,5 мм и жидкое углеводородное топливо, которым смачивался концентрат. Пропорция «кокс: жидкое углеводородное топливо» варьировалась в диапазоне (2,2–2,4) : (0,0–1,0) при расходе кокса от 12 до 36 % от массы концентратов в зависимости от содержания в них оксидов железа.

В процессе исследований определялись: начальная температура восстановления; продолжительность процесса; массовая скорость (динамическим методом — по количеству образовавшихся в единицу времени реакционных газов); состав реакционных газов (CO , CO_2 , H_2O); степень metallизации (отношение $C(\text{Fe}_{\text{мет}})/C(\text{Fe}_{\text{общ}})$, где C — содержание компонента); влияние соотношения удельных расходов жидкого углеводородного топлива и кокса на макрокинетику процесса восстановления, химический состав и структуру конечного продукта.

По описанной методике проведено более 50 экспериментов в двух сериях опытов: 1) восстановление ТМК, ИК и ЖК карбонтермическим

Химический состав исходных концентратов, масс. %

Концентрат	ТМК	ИК	ЖК
SiO_2	2,5	2,62	7,75
TiO_2	15,5	46,75	—
Al_2O_3	1,15	0,6	0,40
Fe_2O_3	34,5	4,22	63,40
FeO	40,5	40,9	26,70
P_2O_5	0,35	0,027	0,025
CaO	1,65	0,33	0,60
V_2O_5	0,4	0,07	—
MgO	0,65	2,81	0,80
MnO	1,8	0,54	0,10
Na_2O	0,6	0,07	0,063
K_2O	0,4	2,62	0,063
S	—	—	0,15

способом в системе «концентрат — кокс»; 2) с ним сравнивался газогенераторный метод восстановления в системе «концентрат — пленка жидкого углеводородного топлива + кокс». Основные характеристики изученных механизмов и макрокинетики этих систем для оптимальных соотношений компонентов шихты и восстановителей приведены в обобщенном виде на рис. 1–3.

Процесс углеродического восстановления ТМК, ИК и ЖК (с разным содержанием TiO_2 и оксидов Fe^{+2} , Fe^{+3} (см. табл. 1)) изучался вплоть до температуры 1100 °C, при которой образование низших оксидов титана и соответственно твердых растворов ильменита с ними термодинамически затруднено [3].

Установлено существенное влияние температуры в интервале 700–1000 °C на степень и скорость восстановления сложных оксидов железа ТМК и ИК (см. рис. 1). С ростом температуры от 700 до 1100 °C степень восстановления железа ТМК повышается от 25 до 92 %, а ИК — от 24 до 85 %.

Массовые скорости восстановления оксидов ТМК, ИК и ЖК (с разным содержанием TiO_2 и оксидов Fe^{+2} , Fe^{+3} (см. табл.)) в условиях карбонтермического восстановления приведены на рис. 2. На основе анализа дифференциальных кривых $dV/dt = f(t)$ углеродического восстановления сложных оксидов железа ТМК, ИК и ЖК в созданных условиях, исключающих влияния кислорода воздуха на ход процесса, установлено, что максимальная массовая скорость

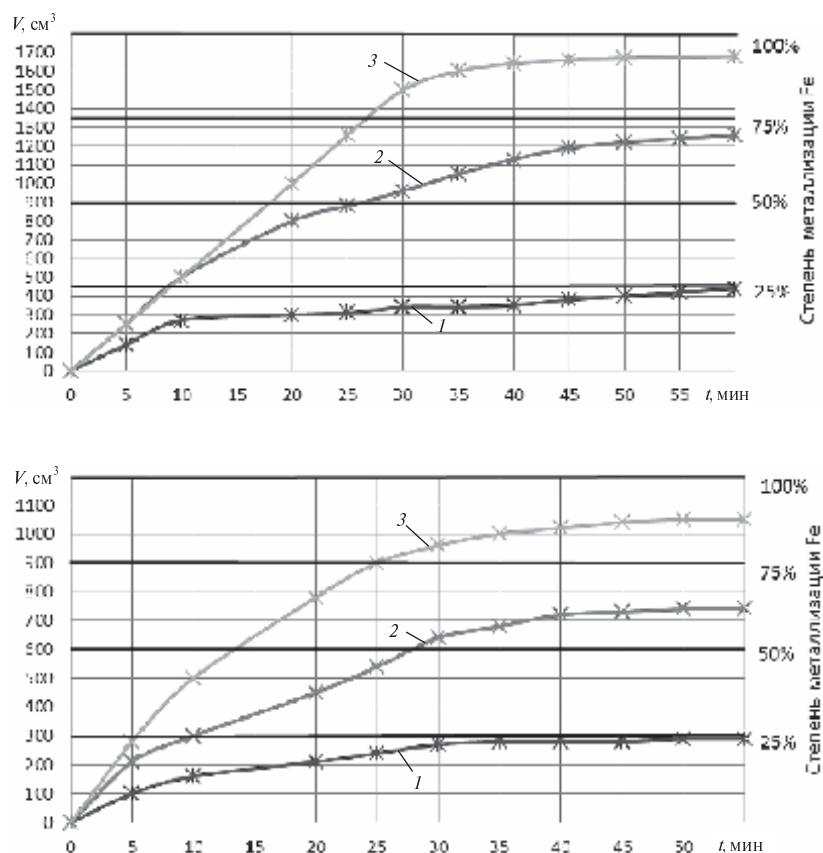


Рис. 1. Влияние температуры (1 — 700 °C; 2 — 850 °C; 3 — 1000 °C) на суммарную скорость углеродического восстановления сложных оксидов Fe^{+2} и Fe^{+3} ТМК(а) и ИК(б)
 V , cm^3 — объем реакционного газа; t , мин — время восстановления

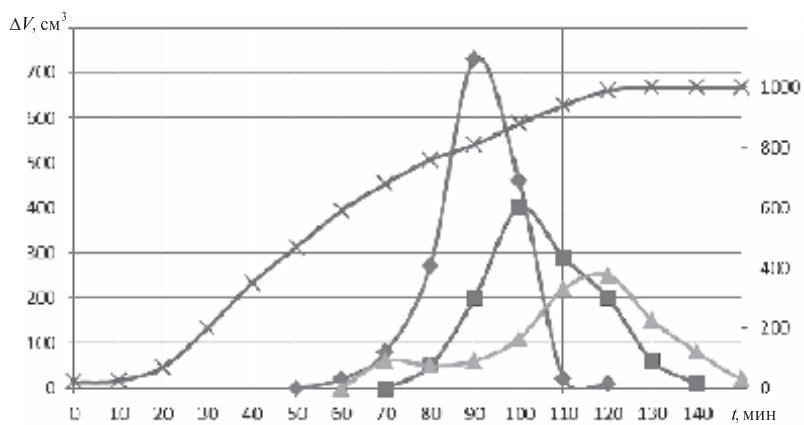


Рис. 2. Массовая скорость восстановления сложных оксидов железа ТМК, ИК и ЖК (V , cm^3 — объем реакционного газа;
 $\Delta V = dV/dt$, $\text{cm}^3/\text{мин}$ — массовая скорость реакции;
 t , мин — время восстановления)



восстановления сложных оксидов железа концентратов достигается при следующих температурах: для ЖК — при 830–860 °С, для ТМК — при 860–890 °С, для ИК — при 960–990 °С. Степень восстановления оксидов Fe^{+2} , Fe^{+3} концентрата соответственно составила: для ТМК ~ 90 %, ИЛ ~ 85 %, ЖК ~ 95 %. Температуры начала восстановления оксидов железа ЖК, ТМК и ИК соответственно равны 580, 600 и 750 °С.

Полученные результаты позволили установить закономерность изменения массовой скорости восстановления железо-титановых кон-

центратов от соотношения содержащихся в них $\text{Fe}^{+2}/\text{Fe}^{+3}$: чем оно больше, тем ниже массовая скорость восстановления оксидов железа, меньшая степень металлизации, выше температура начала заметного восстановления. Следует отметить, что температура начала восстановления ИК ниже, чем у ТМК, и находится на уровне температуры начала восстановления ЖК. Это объясняется возможным наличием в ИК Fe_2O_3 , химически не связанного с TiO_2 .

Исследовано влияние жидкого углеводородов на ход процесса восстановления сложных же-

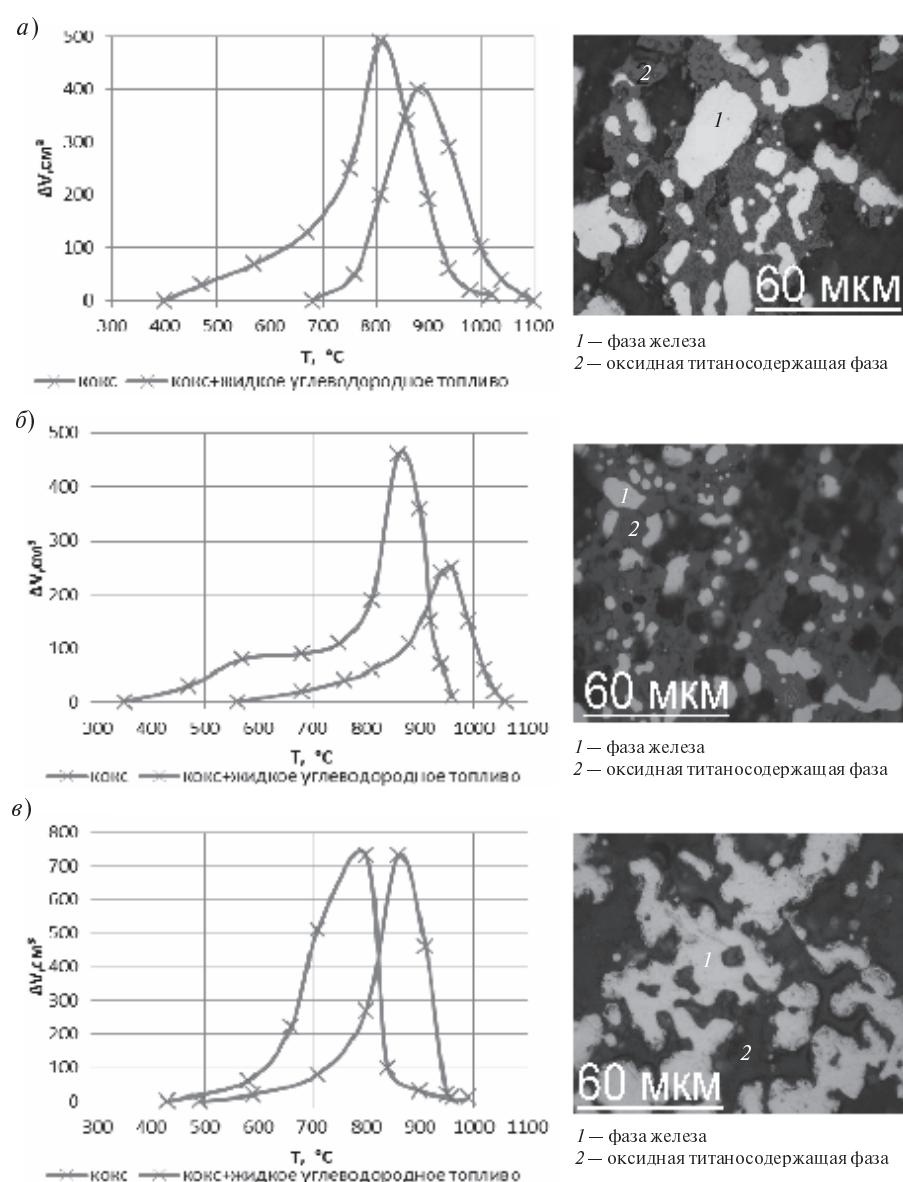


Рис. 3. Влияние добавки жидкого углеводородного топлива на температуру восстановления $T, ^\circ\text{C}$, ТМК (a), ИК (б) и ЖК (в)

зо-титановых концентратов при создании в печи нового газогенераторного процесса (рис. 3). Установлено, что заметное восстановление оксидов железа всех исследуемых концентратов начинается при температуре примерно 500 °C, благодаря использованию смеси активных восстановителей (H_2 , CO , C) — продуктов пиролиза жидкого углеводородного топлива (C_nH_m). Применение нового газогенераторного способа восстановления позволяет: ускорить начальный процесс образования металлической фазы — Fe — и интенсифицировать процесс восстановления в целом.

При создании в печи газогенераторного процесса отмечено снижение температуры восстановления на 100–150 °C (в сравнении с карботермическим восстановлением график сдвигается влево в область низких температур (см. рис. 3)). Наблюдается увеличение массовой скорости протекания процесса в 1,25–1,8 раза по сравнению с углеродным восстановлением этих же концентратов. Рентгеноспектральный и химический анализ конечных продуктов восстановления (содержание $Fe_{\text{мет}}$ и $Fe_{\text{общ}}$, входящих в состав сложных оксидов) показал высокую степень металлизации при применении разработанного газогенераторного способа восстановления. Степень восстановления оксида железа из концентрата при создании в печи газогенераторного процесса увеличилась примерно на 3–5 % и соответственно составила для ТМК ~93 %, ИЛ ~90 %, ЖК ~98 %.

Все исследуемые процессы — эндотермические. В реальных условиях для осуществления необходимого температурного режима в печи необходимо сжигать топливо в потоке кислорода воздуха, т. е. в системе появляется кислород, негативно влияющий на глубину восстановления железа и продолжительность процесса. Предложенный нами газогенераторный метод восстановления позволяет на начальной стадии пленкой

жидких углеводородов изолировать зерна концентрата и кокса от воздействия кислорода воздуха, подаваемого для сжигания топлива в печи, и эффективно развить процессы восстановления.

Применение нового газогенераторного способа восстановления дает возможность обеспечить глубокое восстановление железа титанатов при температурах ниже 1100 °C, ограничить восстановление TiO_2 до низших оксидов и растворение ильменита в полутораокиси титана с образованием твердых растворов, негативно влияющих на процесс селективного разделения железа и титана.

Предложенный способ восстановления позволяет получить конечный продукт (восстановленные огарки титановых концентратов) без заметного оплавления частиц, с хорошо разделенными фазами (металлической — железной и оксидной — титановой), с высокоразвитой активной поверхностью, что оптимально для их разделения на следующих стадиях переработки гидрометаллургическими или физическими методами. Данные, полученные в результате исследования, можно использовать для разработки укрупненной установки восстановительного обжига титаномагнетитовых и ильменитовых концентратов, а также эффективного восстановления железорудных концентратов. Полученные результаты позволяют как оптимизировать существующие технологии переработки железо-титановых концентратов, так и создать новую универсальную комплексную технологию, включающую в себя новый разработанный газогенераторный метод селективного восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов (с использованием кокса и жидких углеводородов → выщелачивания восстановленного огарка → получения искусственного рутилового концентрата).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Пупышев, А.М.** Создание новой комплексной технологии получения искусственного рутилового концентрата из ильменитового (месторождение Гремяха-Вырмес) и титаномагнетитового (Хибинское месторождение) концентратов [Текст] / А.М. Пупышев // Материалы международной научно-практической конф. XXXIX Неделя науки СПбГПУ.— 2010.— Ч. VI.— С. 25–27.
- 2. Пат. 2379356 РФ: МПК C21B13/08.** Способ восстановления ильменитового концентрата [Текст] / И.О. Попов, А.М. Пупышев, Л.С. Самойленко; заявители и патентообладатели Попов И.О., Пупышев А.М., Самойленко Л.С.— № 2008107158/02; заявл. 26.02.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2.
- 3. Резниченко, В.А.** Металлургия титана [Текст] / В.А. Резниченко [и др.].— Изд-во АН СССР, 1963.



4. Гармата, В.А. Металлургия титана [Текст] / В.А. Гармата, Б.С. Гуляницкий, В.Ю. Крамник [и др.].— М.: Металлургия, 1967.— 643 с.

5. Гармата, В.А. Титан [Текст] / В.А. Гармата, А.Н. Петрунько, Н.В. Галицкий [и др.].— М.: Металлургия, 1983.— 559 с.

УДК 669.15-194:620.18:621.78

Ю.К. Николаев, Ю.В. Зеленин, С.Ю. Кондратьев

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Известно, что образование интерметаллида типа FeCr (сигма-фаза) в структуре металла сварных соединений из хромоникелевых аустенитных сталей в процессе эксплуатации при повышенных температурах снижает его пластичность и жаропрочность. Вследствие повышенной склонности этих материалов к тепловому охрупчиванию рекомендуется ограничивать температуры их использования и контролировать количество феррита в структуре металла шва [1–3]. Однако количественные данные о характере образования сигма-фазы в структуре аустенитных сталей в зависимости от параметров эксплуатации и влиянии ее на работоспособность сварных соединений немногочисленны [4, 5]. В связи с этим целью нашей работы было изучение механизма хрупких разрушений сварных соединений аустенитных сталей при высокотемпературной эксплуатации.

Исследовали металл сварных соединений патрубка воздухонагревателя из стали марки 20Х20Н14С2 (ЭИ 211) после эксплуатации в течение двух лет при повышенных температурах.

На рис. 1 показан общий вид верхнего блока воздухонагревателя, а на рис. 2 — основные сварные соединения патрубков. Патрубок коробчатого типа с основанием 1500×1800 мм и толщиной стенки 5,0 мм состоит из двух частей с прямоугольными фланцами 5×20 мм, приваренными двухсторонним угловым швом (рис. 2, б). По периметру фланцы между собой обварены «усиковым» швом (рис. 2, в). У основания патрубок приварен к жесткому корпусу воздухонагревателя односторонним угловым швом. Сварка осуществлялась электродами ЭА-898/21Б (04Х20Н10Г2Б) и ЭА-400/10У (04Х19Н11М3Ф). С учетом теплообмена и перемешивания воздуха средняя температура эксплуатации патрубков составляла 600–650 °С.

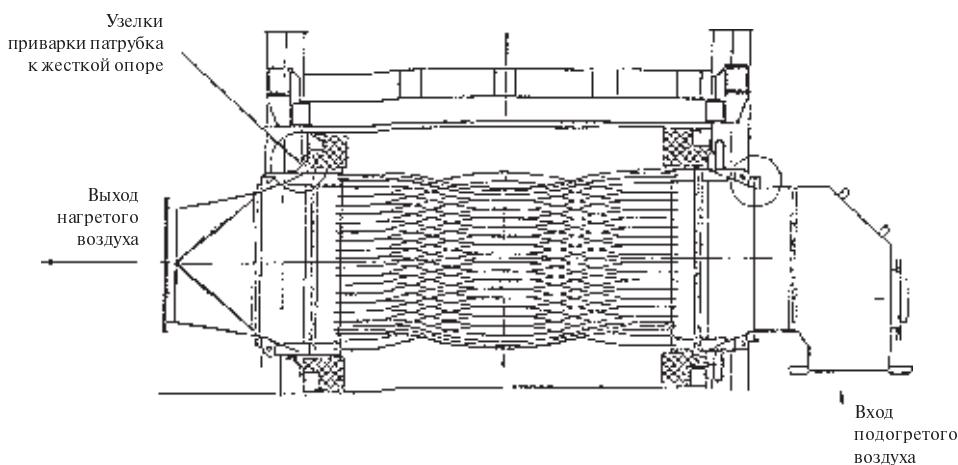


Рис. 1. Общий вид верхнего блока воздухонагревателя

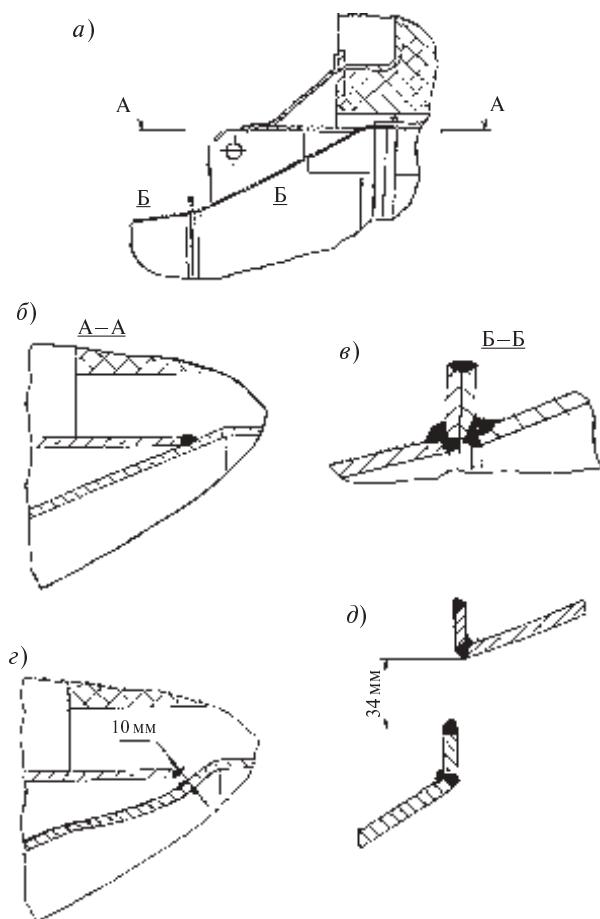


Рис. 2. Схема сварных соединений патрубка воздухонагревателя:

а — общий вид узла приварки патрубка к жесткой опоре; б, г — угловой шов;
в, д — «усиковый» шов.

Состояние: б, в — исходное (после сварки);
г, д — после эксплуатации

Для исследований использовали металл «усикового» сварного соединения фланцев между собой и углового — приварки фланца к патрубку с наработкой 26 тыс. часов (более двух лет) и длиной трещины в «усиковом» шве 1300 мм. Исследовали также металл в области поперечной трещины, образовавшейся в корне «усикового» шва и распространившейся по фланцу в патрубок.

В табл. 1 приведен стандартный химический состав использованных для изготовления патрубка воздухонагревателя свариваемого (20Х20Н14С2) и сварочных (04Х20Н10Г2Б, 04Х19Н11М3Ф) материалов. В табл. 2 дан фактический химический состав исследованного металла шва сварных соединений патрубка и свариваемой стали.

Из данных табл. 1 и 2 следует, что свариваемый металл, использовавшийся для изготовления фланцев и патрубка, по химическому составу соответствует жаростойкой аустенитной высококремнистой стали марки 20Х20Н14С2 (ЭИ 211). Сварка «усикового» и углового (с наружной стороны патрубка) швов осуществлялась электродами ЭА-898/21Б (04Х20Н10Г2Б), а стыковое и угловое сварные соединения выполнялись электродами марки ЭА-400/10У (04Х19Н11М3Ф). Согласно техническим условиям на поставку (ОСТ 5.9370-81) в наплавленном металле сварного шва, выполненного этими электродами, содержание кремния не должно превышать 0,7 масс. %. Однако в данном случае содержание кремния в металле шва повышалось до значений 1,2–1,4 масс. % в связи с перемешиванием расплавленных электродов со свариваемой сталью, причем максимальное содержание обнаружено в корне шва и на расположенных вдоль него границах сплавления.

Визуальное наблюдение с использованием оптической лупы ($\times 3$ – 10) за поведением сварных соединений патрубка в процессе эксплуатации показало, что сквозные трещины образовывались в верхнем «усиковом» шве и в одностороннем угловом шве приварки патрубка к корпусу (рис. 2, г, д). Кроме того, в двух местах (верхняя часть и середина патрубка) образовались попечные трещины, перпендикулярные сварным швам. Сквозные трещины в «усиковом» шве фланца образовались после 15 тысяч часов и увеличивались в размере при дальнейшей эксплуатации. Максимальной длины (1300 мм) трещины в «усиковом» шве достигли после эксплуатации 26 тысяч часов. При эксплуатации происходило также формоизменение верхней и боковых плоскостей патрубков с формированием выпуклостей величиной до 60 мм и смещением верхних кромок разрушенного фланца на 40–50 мм.

Макроструктурный анализ выявил характерную особенность образования трещин. Трещины возникали у концентраторов напряжений в корне шва. Так, в «усиковом» соединении продольные трещины образовались в корне одностороннего шва от зазора величиной 1,8–5,8 мм между фланцами. При большей величине зазора ($> 2,0$ – $3,0$ мм) трещины образовывались у границы сплавления и распространялись в основном вдоль нее на расстояние 0,5–1,0 мм, а в отдельных участках — по металлу шва параллельно

Таблица 1

Стандартный химический состав материалов патрубка

Материал	Содержание элементов, масс. %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V	S по балансу
Сталь 20Х20Н4С2 (ГОСТ 5632-72)	≤ 0,20	2,0–3,0	≤ 1,5	19,0–22,0	12,0–15,0	—	—	—	0,020 0,028
Электроплав ЭА 898/21н (ОСТ 5.9370-81)	≤ 0,10	≤ 0,7	1,1–2,8	17,5–20,5	9,0–10,5	≤ 0,3	0,8–1,2	—	0,025 0,025
Электроплав ЭА 400/10V (ОСТ 5.9370-81)	≤ 0,10	≤ 0,6	1,1–3,1	16,8–19,0	9,0–12,0	2,0–3,5	—	0,30–0,75	0,025 0,030

Таблица 2

Фактический химический состав металла шва и свариваемой стали сварных соединений патрубка воздухонагревателя

Участок сварочного соединения	Содержание элементов, масс. %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V	S	P
Фланец (свариваемая сталь)	0,14	2,1	0,7	19,5	13,4	—	—	—	0,018	0,024
Металл шва («усиковогий» или сварочный стыковой фланец)	0,09	1,2	1,2	18,2	11,2	—	1,2	—	0,012	0,018
Металл шва (двухсторонний стыковой или сварочный стыковой фланец)	0,08	1,4	1,0	17,8	13,2	1,8	—	0,4	0,014	0,021
Металл шва (двухсторонний угловой или патрубка: с наружной стороны / с внутренней стороны)	0,09	1,2	1,8	18,4	11,2	—	1,2	—	0,016	0,019

плоскости фланца. При минимальных зазорах трещины образовывались по центру корневого валика.

Поперечные трещины образовывались в корне шва у «наплывов» высотой ~ 2 мм в зоне начала и окончания двух проходов, выполненных штучными покрытыми электродами.

Аналогичные результаты получены для односторонних угловых швов приварки патрубка к корпусу воздухонагревателя. Важно отметить, что в двухсторонних угловых и стыковых швах трещины не образовывались.

Микроструктуру и фазовый состав основного металла и металла шва после двухлетней эксплуатации при температурах 600–650 °C определяли металлографическим методом на оптическом микроскопе «Reichert-Jung MeF3A» при увеличениях ×400–1000 с использованием программы автоматического количественного анализа изображений согласно процедуре ASTM E 1245-03.

Изготовление и подготовку металлографических шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно стандарту ASTM E 3-95. Образцы для исследований вырезали из «усиковогого», углового и стыковых двухсторонних сварных соединений. Микроструктуру выявляли электролитическим травлением в 10 %-ной щавелевой кислоте и тепловым травлением (окисление полированных микрошлифов при температуре 550 °C с выдержкой 15–20 минут). При электролитическом травлении феррит, карбиды и сигма-фаза в структуре металла шва становятся одинаково темными, что затрудняет их дифференцированную оценку. Тепловое травление позволяет разделить фазы в структуре, поскольку они приобретают разный цвет: сигма-фаза — ярко-светлая, карбиды и границы зерен — темные, феррит — соломенного цвета, аустенит — темно-коричневого.

Металлографический анализ показал, что в процессе эксплуатации в структуре как основ-

ного металла, так и металла шва образуется вторичная фаза, выделяющаяся в виде крупных частиц, между которыми располагаются параллельные и пересекающиеся под углом 40–90° продолговатые частицы, похожие на иглы (рис. 3). При этом в структуре стали выделение происходит по границам зерен, а в металле шва — преимущественно на включениях диссоциированного феррита. Продолговатые частицы второй фазы имеют форму тонких пластин. Можно предположить, что они образуются по плоскостям скольжения или двойникования, возникающих вследствие пластической деформации при короблении стенок патрубка. Ориентация пластин под углом 40–90° относительно друг друга, вероятно, связана со знакопеременностью вектора местных пластических деформаций стенок патрубка при короблении (выпуклость — вогнутость). Соответственно этому образование пластинчатых включений сигма-фазы происходит гораздо позднее, чем образо-

вание ее крупных включений в феррите. Суммарное количество второй фазы в структуре как свариваемой стали, так и металла шва составляет 8–10 объемн. %.

Тепловое травление позволило идентифицировать светлые участки второй фазы как интерметаллидное соединение — сигма-фазу, в отличие от карбидов и границ зерен аустенита с темной окраской. Микрорентгеноспектральный анализ частиц на установке «Комибакс-микро» показал повышенное (35 масс. %) содержание в них хрома и пониженное (менее 5 масс. %) содержание никеля, что также характерно для сигма-фазы. Таким образом, можно заключить, что при высокотемпературной эксплуатации в структуре основного металла и металла шва сварных соединений патрубка в результате процессов теплового старения образуется относительно высокое (8–10 объемн. %) количество хрупкой сигма-фазы.

Образование сигма-фазы в структуре сталей сварных соединений патрубка обуславливает хрупкий характер их разрушения. Так, образовавшиеся в металле тонкие трещины ориентированы по частицам сигма-фазы, вблизи трещин отсутствуют следы пластической деформации (рис. 4). Установлено также, что хрупкое разрушение металла шва с сигма-фазой в структуре может быть вызвано внутренними дефектами технологического происхождения. Например, наличие микропор диаметром 0,04 мм, расположенной рядом с фронтом разрушения, вызвало образование дополнительных микротрещин (рис. 5).

Дополнительным негативным фактором влияния сигма-фазы служит снижение трещинностойкости свариваемой стали и металла шва. Об этом свидетельствует рост поперечных трещин, образовавшихся у концентраторов напряжений в сварных соединениях. Поперечная трещина в «усиковом» шве разрушила фланец и распространилась через угловой шов в патрубок на расстояние 30 мм, а в угловом шве приварки к жесткому корпусу распространилась по патрубку на 150 мм. Металлографические исследования показали, что во всех случаях трещины тонкие без следов пластической деформации, ориентированные по частицам сигма-фазы.

Для установления степени охрупчивания металла в результате эксплуатации определяли его механические свойства. В связи с тем, что сигма-фаза вызывает снижение пластических

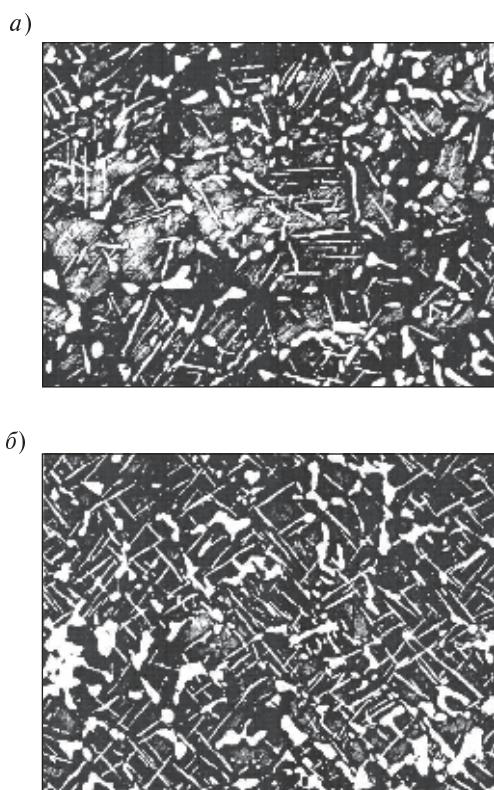


Рис. 3. Микроструктура:
а — основного (20Х20Н14С2),
б — наплавленного (04Х20Н10Г2Б) металла
«усикового» сварного шва после эксплуатации.
Тепловое травление ($\times 1000$)



и вязких свойств, а также повышает чувствительность к концентрации напряжений [6–9], проводили испытания на статическое растяжение гладких цилиндрических образцов и образцов с кольцевым надрезом, а также динамические испытания на ударный изгиб. Образцы вырезали из металла фланцев, поскольку изготовить их из металла шва не представлялось возможным.

Результаты механических испытаний на растяжение при комнатной температуре гладких образцов стали 20Х20Н14С2 после эксплуатации в составе патрубка воздухонагревателя следующие:

Временное сопротивление

разрыву, МПа	840
Предел текучести, МПа.....	508
Относительное удлинение, %	20
Относительное сужение, %	21
Истинное сопротивление разрыву, МПа	1060

Из полученных экспериментальных данных следует, что образование сигма-фазы в структуре этой стали в результате теплового старения приводит к двукратному снижению пластических свойств, однако относительные удлинение (20 %) и сужение (21 %) остаются на сравнительно высоком уровне. Особенностью разрушения образцов является отсутствие «шейки» в месте разрыва, характерного для пластичных сталей аустенитного класса. Деформация — равномерная по всей длине рабочей части образца от момента нагружения до разрушения. Следовательно, происходит общее (по всему сечению образца) пластическое течение аустенитной матрицы, торможение которого частицами хрупкой сигма-фазы (без блокирования общей деформации) вызывает снижение пластичности, в результате чего σ_b стали повышается до 840 МПа.

При испытании на растяжение образцов с кольцевым надрезом пластическая деформация практически отсутствовала. Сопротивление прочности (870 МПа) в этом случае находится на уровне временного сопротивления разрыву (840 МПа), но меньше истинного сопротивления разрушению $S_k = 1060$ МПа, установленного при испытании гладких образцов. Это свидетельствует о пониженной прочности и повышенной чувствительности к концентрации напряжений стали с сигма-фазой в структуре, что вызвано хрупким разрушением сигма-фазы. Согласно [8] расчетное значение хрупкой прочности сигма-

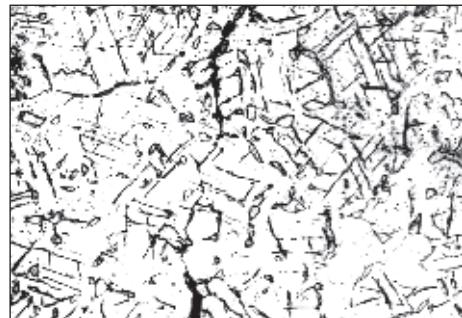


Рис. 4. Микротрещина
в стали 20Х20Н14С2 (фланец патрубка)
с сигма-фазой в структуре.
Электролитическое травление ($\times 1000$)

фазы составляет примерно 700 МПа, что ниже истинного сопротивления разрыву аустенитной стали.

Для оценки вероятности разрушения сварных соединений патрубка воздухонагревателя необходимо определить температурный интервал перехода стали с сигма-фазой в структуре в хрупкое состояние. В то же время известно, что для аустенитных хромоникелевых сталей с гранецентрированной кубической решеткой не характерен температурный интервал перехода в хрупкое состояние и соответственно не выявляется критическая температура хрупкости (T_k). Однако в работе [7] показано, что сигма-фаза вызывает охрупчивание аустенитно-ферритного металла шва, причем не только при низких (комнатной), но также и при повышенных (> 100 °C) температурах вплоть до температур старения (выше 500 °C). В связи с этим в работе были проведены

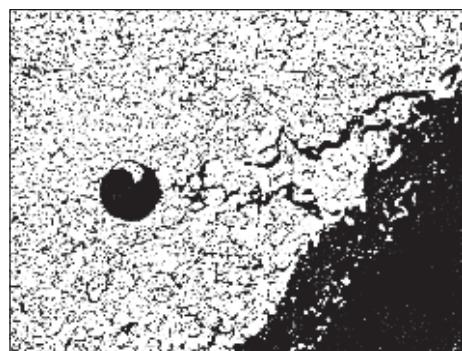


Рис. 5. Микротрещина у поры
в металле (04Х20Н10Г2Б)
«усикового» сварного шва.
Электролитическое травление ($\times 400$)

динамические испытания на изгиб в интервале температур от -100 до $+600$ $^{\circ}\text{C}$ стали 20Х20Н14С2 после эксплуатации патрубка.

Полученные результаты показали, что наличие сигма-фазы в структуре значительно снижает ударную вязкость стали 20Х20Н14С2. При этом на температурной зависимости ударной вязкости выявляются два характерных интервала хрупкости (рис. 6). Первый интервал с максимальной степенью охрупчивания ($\text{KCV} \approx 5,1 \text{ Дж}/\text{см}^2$) соответствует отрицательным и комнатным температурам до $+20$ – 50 $^{\circ}\text{C}$. В этом интервале происходит значительное (более чем в 20 раз) снижение ударной вязкости стали 20Х20Н14С2 по сравнению с минимально заданным значением по техническим условиям ($100 \text{ Дж}/\text{см}^2$) [10] и более чем в 40 раз — по сравнению с вязкостью этой стали, не содержащей в структуре сигма-фазу ($\sim 240 \text{ Дж}/\text{см}^2$). Второй интервал, с более вязкими свойствами стали ($\text{KCV} \approx 9,2 \text{ Дж}/\text{см}^2$), находится при температурах от $+100$ до $+300$ $^{\circ}\text{C}$. Температурный интервал перехода исследованной стали в относительно более вязкое состояние весьма узок и соответствует температурам от $+20$ до $+100$ $^{\circ}\text{C}$. При более высоких температурах (> 300 $^{\circ}\text{C}$) вязкость стали монотонно повышается, однако остается на относительно низком уровне даже при 600 $^{\circ}\text{C}$ ($\text{KCV} = 18,5 \text{ Дж}/\text{см}^2$). Следовательно, при повышенных температурах вязкость стали 20Х20Н14С2 с сигма-фазой в структуре не восстанавливается до стандартного значения.

Полученные результаты согласуются с данными работы [7], где показано аналогичное

влияние наличия сигма-фазы в аустенитно-ферритной структуре на механические свойства металла шва сварных соединений из сталей марок 04Х19Н11М3 и 04Х17Н10М2. В этой работе экспериментально построены температурные зависимости относительных удлинения и сужения металла шва (рис. 7), которые также несколько повышаются в интервале температур от 20 до 100 $^{\circ}\text{C}$, и установлено идентичное изменение ударной вязкости от температуры.

Таким образом, охрупчивающее влияние сигма-фазы в структуре аустенитных и аустенитно-ферритных сталей проявляется не только при низких, но и при повышенных температурах. С повышением температуры степень этого влияния уменьшается, причем ступенчато, с повышением пластических свойств в двух интервалах температур: 20 – 100 $^{\circ}\text{C}$ и 600 – 650 $^{\circ}\text{C}$. Однако пластичность и вязкость таких сталей при повышенных температурах, в отличие от перлитных сталей, полностью не восстанавливаются, а их уровень зависит от количества образовавшейся в структуре при тепловом старении сигма-фазы. Следует отметить, что началу снижения пластических и вязких свойств аустенитно-ферритного металла шва при температуре 100 $^{\circ}\text{C}$ по данным работы [7] соответствует образование в структуре сигма-фазы в количестве $\approx 3,0$ объемн. %. Следовательно, это значение и может быть принято в качестве «порогового» при металлографическом контроле сварных швов конструкций, эксплуатирующихся при повышенных температурах.

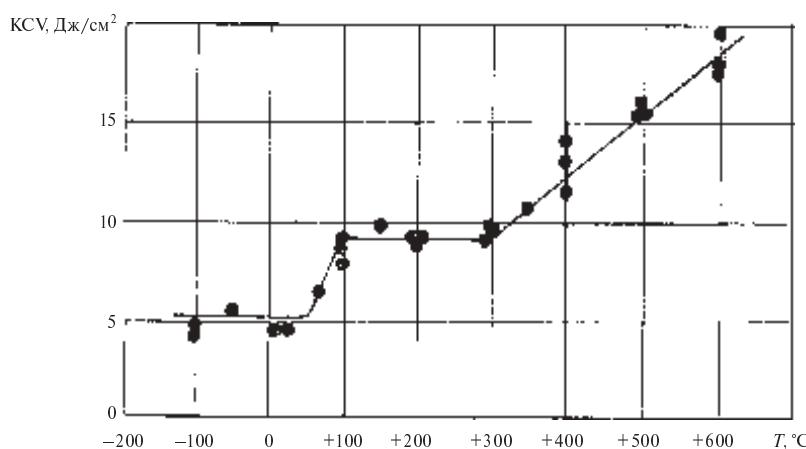


Рис. 6. Температурная зависимость ударной вязкости стали 20Х20Н14С2 (фланец патрубка) с сигма-фазой в структуре

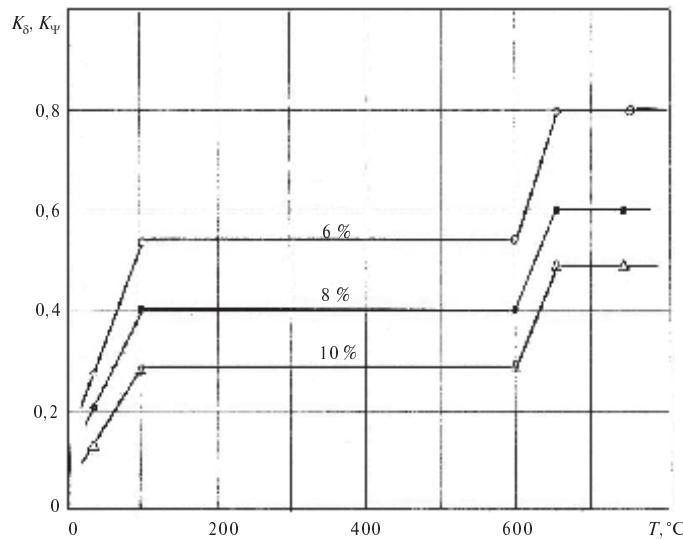


Рис. 7. Температурная зависимость относительного изменения относительного удлинения K_{δ} и относительного сужения K_{ψ} металла сварного шва (04Х19Н11М3, 04Х17Н10М2) с сигма-фазой в структуре в результате теплового старения.

Цифры у кривых — количество сигма-фазы в структуре стали, объемн. %

Анализ полученных результатов исследования причин теплового охрупчивания хромоникелевых аустенитных и аустенитно-ферритных сталей сварных соединений при высокотемпературной эксплуатации позволяет заключить, что оно обусловлено образованием в структуре сигма-фазы. При этом хрупкое разрушение не связано с ударными нагрузками, как предполагалось в работе [1], а вызвано наличием концентраторов напряжений, характерных для сварных соединений. В исследованном патрубке воздухонагревателя такими концентраторами были корневая часть односторонних (без подварки) сварных соединений, а также сварочно-технологические дефекты (грубые наплавы и западания между валиками). Возможно также образование микротрещин от одиночных включений (поры, шлак и др.) в металле шва. Такое влияние сигма-фазы связывается с повышением чувствительности стали после старения к концентрации напряжений, вызванной локальным увеличением напряжений в зонах хрупких частиц сигма-фазы в условиях стесненности пластической деформации аустенитной матрицы в вершине концентратора [6–8]. В условиях концентрации напряжений вследствие стесненности пластической деформации аустенита напряжения в вер-

шине концентратора могут достичь значения хрупкой прочности сигма-фазы и вызывать ее разрушение с образованием одной или нескольких микротрещин. Высвобождающаяся при этом упругая энергия способствует дальнейшему разрушению стали с поэтапным чередованием хрупкого и вязкого характера распространения трещины. Дальнейшее разрушение может происходить по следующим схемам в зависимости от размера, формы и количества образовавшихся в структуре частиц сигма-фазы:

хрупкое разрушение одной из близлежащих к концентратору напряжений частицы сигма-фазы с последующим вязким разрушением аустенитной перемычки между двумя соседними хрупкими частицами сигма-фазы и т. д.;

хрупкое разрушение одновременно нескольких частиц сигма-фазы в вершине концентратора напряжений с последующим вязким доломом аустенитных перемычек между разрушенными хрупкими частицами и дальнейшим распространением трещины до следующих неразрушенных частиц с последующим их хрупким разрушением и т. д.

Следовательно, при оценке влияния сигма-фазы в структуре стали на работоспособность сварных конструкций необходимо рассматривать

два этапа разрушения: образование трещин вследствие наличия концентраторов напряжений и их рост по сечению сварного шва вплоть до сквозного повреждения и распространения в свариваемую сталь с последующей потерей несущей способности сварной конструкции в целом.

Следует особо отметить, что разрушение сварных соединений патрубка воздухонагревателя, как отмечалось выше, не связано с ударными нагрузками. При этом статическое нагружение в рассматриваемом случае было минимальным, поскольку избыточное давление нагреваемого атмосферного воздуха не превышает 0,02 МПа. В связи с этим хрупкое разрушение сварных соединений патрубка вызывается термическими напряжениями, возникающими из-за нестационарности температурных полей при эксплуатации в связи с переходными температурными режимами (нагрев, охлаждение и т. д.). О наличии высоких термических напряжений свидетельствует также коробление патрубка воздухонагревателя.

В результате выполненных исследований причин разрушения сварных соединений патрубка воздухонагревателя из легированной кремнием хромоникелевой стали 20Х20Н14С2 (ЭИ 211) после эксплуатации в течение двух лет при повышенных температурах установлено следующее. При длительной эксплуатации в области рабочих температур (~ 600 °C) в аустенитно-ферритной структуре металла шва из сталей 04Х20Н10Г2Б и 04Х19Н11М3Ф и в аустенитной структуре свариваемой стали 20Х20Н14С2 об-

разуется относительно высокое количество (до ~ 10 объемн. %) малопластичной сигма-фазы, которая вызывает хрупкие разрушения сварных соединений в условиях наличия концентраторов напряжений конструктивного и технологического характера и возникновения при эксплуатации термических напряжений, превышающих хрупкую прочность металла шва, подвергшегося тепловому старению.

В связи с этим для предотвращения возможности хрупкого разрушения металла при высокотемпературной эксплуатации сварных конструкций с концентраторами напряжений на стадии проектирования высокотемпературного оборудования и трубопроводов необходимо:

ограничивать количество образующейся при эксплуатации сигма-фазы в аустенитно-ферритной структуре металла шва менее 3 объемн. % за счет ограничения количества ферритной фазы в исходной структуре (после сварки) металла шва путем строгого регламентирования химического состава используемых свариваемых и сварочных материалов и проведения термической обработки (аустенизации) сварных соединений;

исключить в сварных конструкциях, работающих при температурах выше ~ 500 °C, присутствие концентраторов напряжений конструктивного и технологического характера;

ужесточить требования к качеству сварных соединений с целью обеспечить минимальные размеры сварочно-технологических дефектов;

исключить применение односторонних сварных соединений без подварки корня шва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медовар, Б.И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей [Текст] / Б.И. Медовар.— Киев.: Машгиз, 1958.— Изд. 2-е, 339 с.
2. Земзин, В.Н. Жаропрочность сварных соединений [Текст] / В.Н. Земзин.— Л.: Машиностроение, 1972.— 272 с.
3. Земзин, В.Н. Влияние ферритной фазы на свойства аустенитного наплавленного металла [Текст] / В.Н. Земзин, Г.Л. Петров // Сварочное производство.— 1967.— № 5.— С. 6–8.
4. Chastell, D.J. The Formation of the γ Phase during Long Term High Temperature Creep of Type 316 Austenitic Stainless Steel [Текст] / D.J. Chastell, P.E.J. Flewitt // Materials Science and Engineering.— 1979. Vol. 38. № 2.— P. 153–162.
5. Hall, E.O. The Sigma Phase [Текст] / E.O. Hall, S.H. Algie // Journal of the Institute of Metals. Metallurgical Reviews. 1966.— Vol. 11.— P. 61–87.
6. Карзов, Г.П. Влияние содержания кремния и углерода на тепловое охрупчивание хромоникелевого аустенитно-ферритного металла шва [Текст] / Г.П. Карзов, Ю.К. Николаев, Ю.В. Зеленин // Вопросы материаловедения.— 2000. № 4 (24).— С. 58–62.
7. Николаев, Ю.К. Оценка экстремальных температурных условий эксплуатации хромоникелевого аустенитно-ферритного металла шва [Текст] / Ю.К. Николаев // Автоматическая сварка.— 1985. № 1 (382).— С. 20–23.
8. Воловельский, Д.Э. Малоцикловая усталость хромоникелевой стали в связи с высокотемпературным охрупчиванием [Текст] / Д.Э. Воловельский, А.Ф. Малыгин, Ю.К. Николаев // Вопросы судостроения. Серия: Металловедение.— 1982.— Вып. 35.— С. 3–10.



9. Николаев, Ю.К. Термовое охрупчивание хромоникелевого аустенитно-ферритного металла шва в связи с образованием сигма-фазы [Текст] / Ю.К. Николаев, Г.П. Карзов // Сб. «Прогрессивные материалы и технологии». — СПб.: Изд-во

ЦНИИ КМ «Прометей», 1999. — № 3. — С. 18–22.

10. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) [Текст] / ГАЭН СССР.— М.: Энергоатомиздат, 1989.

УДК 669:539.261:539.531

А.Г. Акуличев, В.Д. Андреева,
В.В. Трофимов

СУБСТРУКТУРА НИТРОЦЕМЕНТОВАННОЙ СТАЛИ 20Х3МВФ-Ш ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Для разработки оптимальных режимов химико-термической обработки (ХТО) и дальнейшей механической обработки деталей необходимы детальное изучение структуры и субмикроструктуры упрочненного слоя, явлений, протекающих при закалке и последующей термической обработке упрочненных деталей, выявление факторов, влияющих на безотказную работу таких изделий.

Структуре, свойствам, последующей обработке упрочненных ХТО материалов посвящено множество публикаций, раскрыты некоторые параметры, от которых зависит долговечность этих материалов. Однако до сих пор практически не освещены вопросы исследования тонкой структуры упрочненных ХТО слоев и ее эволюции после различных обработок. Эта проблема остается одной из актуальных для техники, имеет большое научное и практическое значение. Ее решение открывает большие возможности для рационального выбора режимов обработки и неразрушающего контроля как полуфабрикатов на производстве, так и готовых деталей в процессе эксплуатации.

В статье изложены методика и результаты послойного рентгенографического исследования образцов нитроцементованной стали 20Х3МВФ-ш, подвергнутым термической обработке по серийному режиму, часто применяемому в промышленности. Цель работы — исследование субмикроструктуры по глубине слоя. По сведениям авторов, такого рода исследования материалов, подвергнутых нитроцементации, ранее не проводились.

Материалы и методика эксперимента

Материалом для исследования послужила сталь теплостойкая 20Х3МВФ-ш, применяемая в авиационном машиностроении при производстве ответственных деталей и узлов главных и хвостовых редукторов, элементов трансмиссии отечественных вертолетов, зубчатых колес газотурбинных двигателей. Нитроцементацию производили в промышленных условиях в среде науглероживающих газов и 5 % аммиака при температуре 860 °С в течение 2-х часов. Режимы последующей термической обработки образцов указаны в таблице.

Закалку образцов проводили в баке с маслом, нагретом до температуры 60 °С.

Субмикроструктуру основных фаз нитроцементованной стали 20Х3МВФ-ш исследовали методами рентгенографического анализа.

Для исследования параметров субструктуры с образцов последовательно удаляли тонкие слои электролитическим травлением и после снятия каждого слоя производили съемку рентгенограмм. Электролитическое стравливание производили в растворе, состоящем из 70 мл ортофосфорной кислоты, 20 г хромового ангидрида и 10 мл воды, с использованием медного катода по такому режиму: напряжение 5–6 В, плотность тока 0,5–0,6 А/см².

Рентгенографический анализ образцов проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance с вертикальным расположением гониометра, использованием фильтрованного характеристического СиКб-излучения и вращением образца

Режимы термической обработки образцов стали 20Х3МВФ-ш

Этапы	Обработка	Отпуск
Стерилизация при температуре	—	—
Стерилизация при температуре	Температура — 65 °С. Нагрев — 3 часа	Температура 280 °С. Нагрев: 50 мин Нагрев: 40 мин Среда охлаждения — воздух
Вспомогательные температура 860 °С. Нагрев 7–8 мин.		

со скоростью 30 об./мин.; шаг сканирования 0,02° по шкале 2θ; время съемки на шаг — 5–10 с. Регистрация дифрактированных лучей выполнялась с помощью высокоскоростного позиционно-чувствительного детектора LynxEye.

Полученные рентгенограммы были исследованы методом полнопрофильного анализа при использовании программного обеспечения MAUD (Microstructure analysis using diffraction) [1]. Для описания профилей линий в MAUD применяется функция псевдо-Фоййт (pV). Расчетная дифрактограмма моделируется посредством уточнения структурных (решетка, координаты и тепловые колебания атомов и т. д.) и микроструктурных (размер кристаллитов и величина среднеквадратичной микродеформации) параметров, текстурных коэффициентов, параметров профиля линий и фона.

Инструментальные параметры, используемые при обработке дифракционных спектров, определяли уточнением рентгенограммы отожженного образца стали 20Х3МВФ-ш.

Для анализа субмикроструктуры нитроцементованной стали была использована обратная методика гармонического анализа, суть которой состоит в подборе значений среднего размера областей когерентного рассеяния (ОКР) и величины среднеквадратичной микродеформации кристаллической решетки (МКД) с целью уточнения параметров математической модели экспериментального профиля — $\beta_{1/2}$ и η [2]. Здесь $\beta_{1/2}$ — полуширина на половине высоты дифракционного пика; η — коэффициент, характеризующий степень приближения к функции Гаусса.

В случае анизотропии размеров ОКР и МКД они могут быть определены с помощью модели, предложенной автором [3] и использованной в MAUD.

Известно, что деформационные дефекты упаковки в ГЦК структурах приводят к законо-

мерному смещению дифракционных линий, а двойниковые дефекты — к асимметрии линии. Помимо этого оба вида дефектов вносят вклад в симметричное уширение линии. Влияние деформационных дефектов на уширение и смещение рентгеновских линий остаточного аустенита учитывалось при уточнении расчетной рентгенограммы по методу Уоррена [4, 5].

Уточняемыми параметрами при обработке рентгенограмм в MAUD являются концентрация дефектов упаковки (α) и двойниковых дефектов (β).

Коррекцию расчетной дифрактограммы для случая преимущественной ориентации проводили с помощью уточнения текстурного коэффициента GP модели Марча — Долласа [6].

Критерием соответствия модели эксперимен-

タルным данным служит соотношение $\sigma = \frac{R_{wp}}{R_{exp}}$,

отражающее добродельность обработки, где минимизируемые посредством метода наименьших квадратов функционалы R_{wp} и R_{exp} имеют вид

$$R_{wp} = \left[\frac{\sum_i w_i (I_{io} - I_{ic})^2}{\sum_i w_i I_{io}^2} \right]^{1/2}; \quad R_{exp} = \left[\frac{N - P}{\sum_i w_i I_{io}^2} \right]^{1/2}.$$

Здесь I_{io} и I_{ic} — соответственно экспериментальные и расчетные интенсивности; N — число экспериментальных точек; $w_i = 1 / I_{io}$ — весовой множитель; P — число уточняемых параметров.

Результаты и их обсуждение

Уточнение рентгенограмм выполнялось в следующем порядке: параметры фона и масштабный фактор → параметры кристаллической решетки → параметры микроструктуры → концентрация деформационных дефектов → па-



метр изотропных статистических колебаний атомов $B_{iso} \rightarrow$ текстурный коэффициент GP . Пример обработки рентгенограммы с последовательным включением в модель дополнительных уточняемых параметров показан на рис. 1, $a - \varepsilon$. Уточнение проводили до тех пор, пока значение σ не приближалось к единице, что является подтверждением удовлетворительного качества обработки.

Ранее было показано [7], что основными фазовыми составляющими на поверхности нитроцементованного слоя являются мартенсит (α' -фаза), остаточный аустенит (γ -фаза) и карбонитриды на базе цементита Fe_3C . Максимальное содержание карбонитридов — 17 % — наблюдается в непосредственно закаленном образце на расстоянии 20 мкм от поверхности. По измерениям периодов решетки, ширины дифракционных линий α' -фазы и микротвердости определено, что глубина нитроцементованного слоя составила 0,45 мм [7].

Результаты рентгенографического анализа тонкой структуры мартенсита и аустенита пока-

зывают, что блоки мозаики мартенсита имеют сложную эллипсоидную форму, тогда как блоки аустенита имеют шарообразную форму. В связи с малой интенсивностью отражений на глубине более 0,2 мм и в образце, обработанном по режиму № 3, достоверные данные о параметрах субмикроструктуры аустенита получить не удалось.

Распределения размеров блоков и микроискажений в плоскости (110) мартенсита по глубине имеют сложный характер (рис. 2, 3).

Наименьший размер имеют ОКР мартенсита на поверхности и в приповерхностном слое. На глубине 40–80 мкм в образце, подвергавшемся непосредственной закалке, наблюдается резкое увеличение размера блоков α' -фазы. В этой же области непосредственно закаленной нитроцементованной стали 20Х3МВФ-ш обнаружено наибольшее содержание остаточного аустенита в слое [7]. Известно [8], что мартенситное превращение сопровождается значительными деформациями. Сдвиговый характер атомных перемещений, осуществляемых в упругой среде,

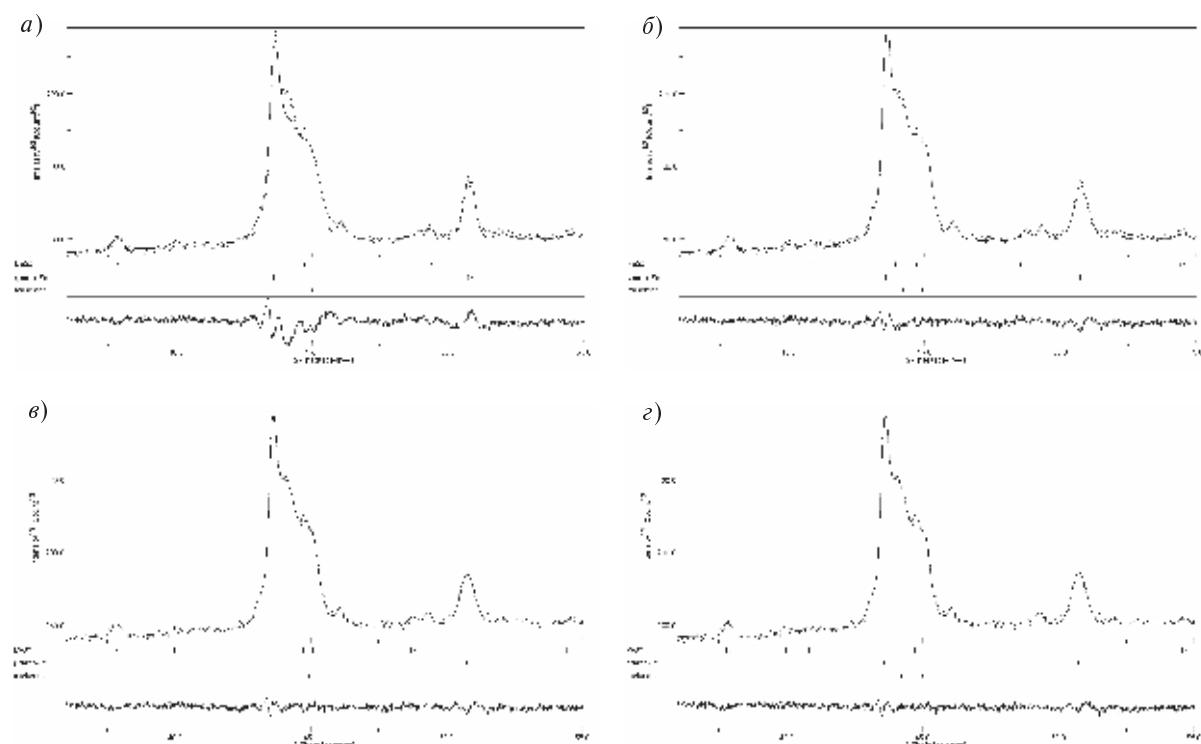


Рис. 1. Отрезок экспериментальной и моделируемой рентгенограммы нитроцементованной стали на расстоянии 20 мкм от поверхности:

a — изотропная модель ОКР-МКД ($\sigma = 1,63$); b — анизотропная модель ОКР-МКД ($\sigma = 1,26$);
 c — то же, что и для (b), с включением в модель деформационных дефектов и уточнением параметра B_{iso} ($\sigma = 1,18$); d — то же, что и для (c), с уточнением текстурного коэффициента GP ($\sigma = 1,16$)

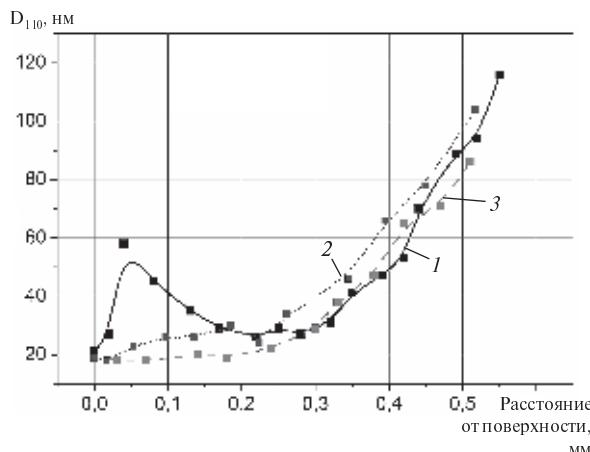


Рис. 2. Зависимость размеров блоков мартенсита от глубины нитроцементованного слоя для режимов 1, 2, 3

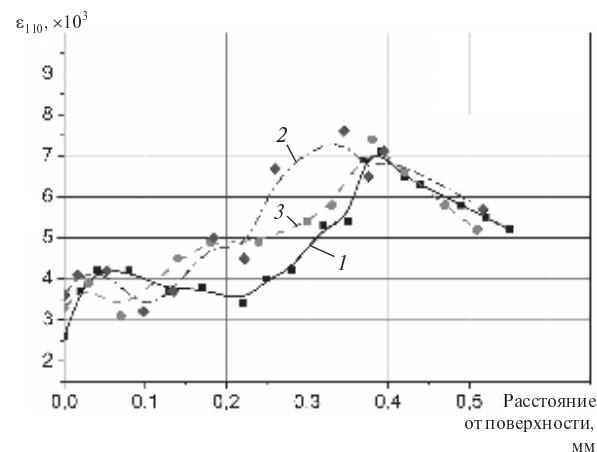


Рис. 3. Зависимость МКД мартенсита от глубины нитроцементованного слоя для режимов 1, 2, 3

приводит к существенным изменениям в процессе и результате самого превращения — к возникновению значительных упругих искажений и пластических деформаций на фоне растущего кристалла мартенсита. Значит, превращение аустенита в мартенсит во время закалки стали приводит к значительному снижению размера блоков вследствие их дробления при значительных напряжениях и пластических деформациях, которые сопровождают это превращение. При этом в тех зонах нитроцементованного слоя, где произошло наиболее полное мартенситное превращение, блоки мартенсита имеют наименьший размер, в отличие от областей со значительным содержанием остаточного аустенита. Следовательно, средний размер ОКР мартенсита существенно зависит от степени мартенситного превращения.

В образце, обработанном по режиму № 3 и имеющем наименьшее количество остаточного аустенита в заэвтектоидной и эвтектоидной зонах упрочненного слоя, обнаружены наименьшие размеры ОКР мартенсита — 18 нм. Несколько большие размеры кристаллитов мартенсита — 21–24 нм — наблюдаются в заэвтектоидной и эвтектоидной зонах нитроцементованного слоя образца, обработанного по режиму 2 и имеющего промежуточное содержание остаточного аустенита.

На глубине нитроцементованного слоя 220–300 мкм размеры блоков мартенсита остаются практически неизменными — порядка 20–30 нм. В переходной зоне и в сердцевине наблюдается

достаточно резкий рост размеров ОКР, которые достигают 100–120 нм.

Изменение размера блоков мартенсита по глубине в переходной зоне образцов после обработки по режимам 2 и 3 имеет аналогичный характер. В сердцевине наименьший размер — 86 нм — имеют кристаллиты в образце, подвергнутому термической обработке по режиму 3.

После закалки мартенсит в нитроцементованном слое и сердцевине характеризуется достаточно высоким уровнем микродеформаций. Изменение МКД по глубине для всех образцов имеет сходный характер (рис. 5). В поверхностной зоне наблюдаются наименьшие значения МКД — около $3 \cdot 10^{-3}$, в заэвтектоидной и эвтектоидной зонах несколько больше — $(3-4) \cdot 10^{-3}$, максимум значений МКД — $(5-7) \cdot 10^{-3}$ — находится в переходной зоне на глубине слоя 0,3–0,4 мм. В сердцевине уровень МКД снижается до $5 \cdot 10^{-3}$. На рис. 3 видно, что в образцах, подвергшихся после закалки обработке холодом и низкому отпуску, снижения значений МКД не происходит; наоборот, в эвтектоидной и частично переходной зонах значения МКД значительно выше.

Незначительное увеличение значений МКД в эвтектоидной и переходной зонах нитроцементованного слоя всех образцов может быть связано с более полным превращением аустенита в мартенсит при закалке, а также с увеличением плотности дислокаций в кристаллитах мартенсита.

Сравнивая результаты настоящего исследования с данными, полученными на азотированной стали [9], можно отметить существенную



разницу в субструктуре и источниках внутренних напряжений. Авторы [9], исследуя упрочненный слой стали после низкотемпературного азотирования с помощью дифракции рентгеновских лучей и просвечивающей электронной микроскопии, обнаружили, что размеры ОКР практически соответствуют расстоянию между выделениями нитридов. Феномен уширения рентгеновских пиков объясняется выделением нитридных частиц, упрочняющих матрицу и связанных с полем макронапряжений в упрочненном слое. Свидетельств наличия дислокаций в азотированном слое обнаружено не было [9].

В случае же нитроцементованного слоя уширение дифракционных линий мартенсита вызывается как малыми размерами ОКР, так и высокими значениями микронапряжений, в отличие от азотированного слоя, в котором основной вклад в уширение дифракционных линий дает дисперсность кристаллитов при пренебрежимо малых значениях МКД. Следовательно, размытие дифракционных линий мартенсита, а значит, и упрочнение материала нитроцементованного слоя связаны не только с наличием дисперсных частиц карбидов и карбонитридов, но и со значительным количеством дефектов кристаллического строения, которые характеризуются дальнодействующими полями смещений атомов (дислокации и их скопления), а также малыми размерами блоков мартенсита.

Для субмикроструктуры аустенита характерны большие размеры блоков и меньшая величина микродеформаций, чем в субмикроструктуре мартенсита (рис. 4, 5).

Наибольшее деформационное упрочнение γ -фазы образца после закалки наблюдается на поверхности и на глубине более 170 мкм. Эти области характеризуются наименьшими размерами блоков и повышенными значениями МКД. Об этом также свидетельствует тот факт, что в поверхностных слоях наблюдается наибольшая концентрация деформационных дефектов, достигающая $6,85 \cdot 10^{-3}$. В более глубоких (>40 мкм) слоях концентрация деформационных дефектов достаточно низкая и не превышает погрешность ее определения рентгеновским методом — $1 \cdot 10^{-3}$ [5]. Максимуму размера ОКР и минимальным микроискажениям соответствует область на глубине 40–80 мкм от поверхности, где также наблюдается локальный максимум размера блоков мартенсита. На глубине слоя 170 мкм наблюда-

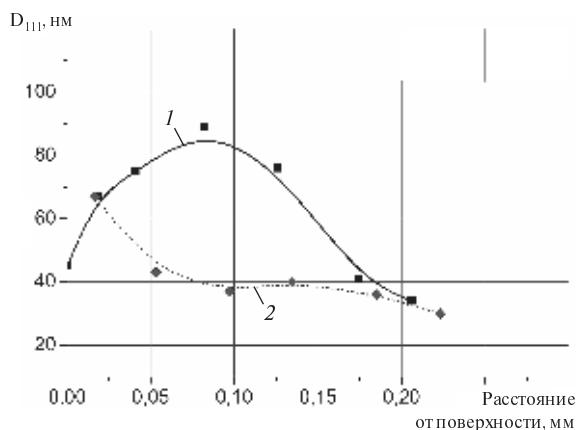


Рис. 4. Зависимость размеров ОКР аустенита от глубины нитроцементованного слоя в режимах 1 и 2

ется уменьшение размера кристаллитов и рост величины среднеквадратичной МКД решетки аустенита вследствие, по-видимому, более полного $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращения и связанных с этим значительных напряжений.

Аустенит в эвтектоидной зоне образца, подвергнутого криогенной обработке и отпуску по режиму № 2, характеризуется меньшим размером кристаллитов (порядка 40 нм) и, следовательно, большим деформационным упрочнением.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

Впервые новейшими методами послойного рентгенодифракционного анализа исследована тонкая структура закаленной нитроцементованной стали 20Х3МВФ-ш. Получены значения

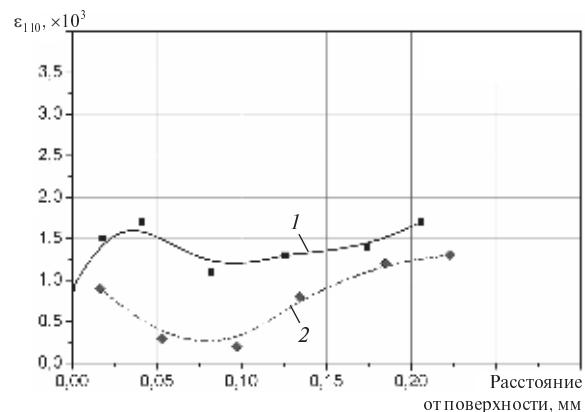


Рис. 5. Зависимость МКД аустенита от глубины нитроцементованного слоя в режимах 1 и 2

параметров субмикроструктуры основных фаз по всей глубине упрочненного слоя.

В субструктуре мартенсита закаленного нитроцементованного слоя наблюдаются малые размеры блоков (в пределах 20–30 нм) и высокий уровень микрискажений кристаллической решетки. Это обусловлено значительными внутренними макронапряжениями в слое при диффузионном насыщении углеродом и азотом, а также градиентом температур и фазовых превращений при закалке.

Остаточный аустенит характеризуется значительно меньшей степенью деформационного упрочнения, чем мартенсит, что выражается в меньшем уровне микрискажений кристалли-

ческой решетки и повышенных размерах блоков аустенита.

Обработка холодом приводит к дополнительному превращению значительных объемов остаточного аустенита, что вызывает дополнительное упрочнение, которое выражается в дроблении блоков и росте плотности дислокаций в мартенсите. Низкий отпуск, проведенный после закалки и обработки холодом, существенного влияния на величину ОКР, МКД не оказывает.

В мартенсите основного металла и прилегающей к нему зоны слоя сохраняется высокий уровень макронапряжений при значительном увеличении размеров кристаллитов по сравнению с мартенситом нитроцементованного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lutterotti, L. Total pattern fitting for the combined size-strain-texture determination in thin film diffraction [Текст] / L. Lutterotti // Nucl. Instrum. Meth. B.— 2010.— Vol. 268.— P. 334–340.
2. Lutterotti, L. Simultaneous Structure and Size-Strain Refinement by Rietveld Method [Текст] / L. Lutterotti, P. Scardi // J. Appl. Cryst.— 1990.— Vol. 23.— P. 246–252.
3. Popa, N.C. The (hkl) dependence of diffraction-line broadening caused by strain and size for all Laue groups in Rietveld Refinement [Текст] / N.C. Popa // J. Appl. Cryst.— 1998. Vol. 31.— P. 176–180.
4. Warren, B.E. X-ray Diffraction [Текст] / B.E. Warren.— Reading, MA: Addison-Wesley, 1969.— 381 p.
5. Вишняков, Я.Д. Современные методы исследования структуры деформированных кристаллов [Текст] / Я.Д. Вишняков.— М: Металлургия, 1975.— 480 с.
6. Dollase, W.A. Correction of Intensities for Preferred Orientation in Powder Diffractometry: Application of the March Model [Текст] / W.A. Dollase // J. Appl. Cryst.— 1986.— Vol. 19.— P. 267–272.
7. Акуличев, А.Г. Исследование закаленного нитроцементованного слоя стали 20Х3МВФ методом полнопрофильного анализа рентгенограмм [Текст] / А.Г. Акуличев, В.Д. Андреева, В.В. Трофимов // Научно-техн. ведомости СПбГПУ Сер. Наука и образование.— 2011. № 1(117).— С. 173–176.
8. Максимова, О.П. О превращении аустенита в мартенсит [Текст] / О.П. Максимова // Проблемы металловедения и физики металлов.— 1964. Вып. 8.— С. 169–186.
9. Barrallier, L. X-ray and Transmission Electron Microscopy Investigation of Strain in a Nitrided Steel: No evidence of Plastic Deformation [Текст] / L. Barrallier, R. Soto, J.-M. Sprauel, A. Charai // Metallurgical and Materials Transactions A.— 1997. Vol. 28A.— P. 851–857.

УДК 669-1:669.2

*В.В. Мишин, И.А. Шишов,
А.В. Забродин, Ю.Е. Маркушкин*

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

Выбор и обоснование критерии разрушения металлов при холодной прокатке приобретает особую значимость при изготовлении фольг из хрупких и малопластичных металлов, в частности бе-

риллия. Изложенные в публикациях и применяемые в расчетах макроскопические критерии разрушения (например, [1, 2]) и микроскопические модели разрушения [3–5] не могут быть исполь-



зованы для разработки технологий прокатки бериллия, поскольку этот и другие хрупкие металлы чрезвычайно чувствительны к структурным или случайным факторам. Такие особенности технологического процесса, как неравномерность деформации, неравномерность температуры металла, особенности формирования структуры металлов, не учитываются критериями разрушения. Между тем технология изготовления тонких фольг из бериллия должна строиться с учетом особенностей данного металла, непосредственно влияющего на пластичность.

Бериллий относится к группе высокомодульных гексагональных металлов с соотношением параметров решетки $c/a = 1,5671$, что меньше идеального. Уникальность свойств и трудности технологии прокатки определяют высокую стоимость бериллиевой фольги на мировом рынке: цена 1 кг вакуумногранитной фольги толщиной менее 15 мкм составляет $(15-20)10^6$ долл./кг. Особенную высокую ценность имеет фольга из высокочистого бериллия, стоимость которого может достигать $(150-160)10^6$ долл./кг. В общем случае стоимость фольги зависит от толщины, качества поверхности, содержания примесей, физических характеристик (вакуумная и оптическая плотности, т. е. способности удерживать вакуум и не пропускать свет сквозь микропоры).

Отсутствие решения известной всем материаловедам проблемы хрупкости бериллия не позволяет даже ведущим в технологическом отношении странам разработать экономичные и широкодоступные способы получения вакуумногранитной бериллиевой фольги. В связи с высокой научной сложностью технологии любое достижение в области теории обработки бериллия может существенно повлиять на конъюнктуру мирового бериллиевого рынка и, опосредованно, на интенсивность научных исследований в смежных областях (приборостроение, лазерная, рентгеновская техника), где используются изделия из бериллия [5].

В связи с разработкой технологии получения сверхчистого бериллия гидридным методом в виде высокопористой губки с нанометрической толщиной стенок [6, 7] проблема борьбы с хрупкостью бериллия и создание технологий изготовления тонких фольг, в том числе методом холодной прокатки, приобретают особую актуальность [5]. Цель нашего исследования — анализ и разработка критерия разрушения, который можно

использовать для назначения режимов пластической деформации малопластичных металлов, в первую очередь — бериллия.

Наиболее сложным переделом при изготовлении фольги из нанокристаллического высокопористого бериллия традиционно считается холодная прокатка горячепрессованного и горячекатаного бериллия в виде образцов толщиной 200–500 мкм, поскольку проблемы хрупкости этого металла в полной мере проявляются именно при холодной деформации. При проведении опытных прокаток бериллиевой фольги в холодном состоянии было отмечено, что любая неравномерность деформации по ширине и длине очага деформации, в том числе и высокие обжатия за проход, значительно снижает технологическую пластичность бериллия. Дополнительно усложняет деформирование бериллия, как считается в [5], значительная анизотропия межатомных связей, причем металлическая связь концентрируется в основном в плоскости базиса, а ковалентные связи — в направлении оси базиса. Этот факт приводит к аномально низким значениям поверхностной энергии для плоскости базиса ($\gamma_{s,0001} = 0,232 \text{ Дж}/\text{м}^2$), что обуславливает существование в бериллии слабого звена — спайности вдоль плоскостей базиса. Как правило, в бериллии происходит хрупкое разрушение вдоль базисных плоскостей, внешний вид которого привел к созданию критерия Гилмана — Рожанского — Стро [5].

Критерий разрушения для одноосного растяжения

В критерии разрушения, полученном в [8, 9], используется информация об изменении поверхностной энергии при разрушении металлов во время одноосного растяжения. Учитывается, что в исходном недеформированном состоянии в металле присутствуют дефекты кристаллического строения, создающие поля внутренних напряжений: примесные атомы, вакансии, дислокации, границы и др. Отмечается, что межзеренная или межфазная границы представляют собой, как и свободная поверхность, границы раздела, которые отличаются друг от друга величиной удельной поверхностной энергии: γ'_s — для границы, γ_s — для свободной поверхности.

При появлении трещины в объеме, в котором уже присутствует граница, обладающая удельной энергией γ'_s , системе необходимо добавить

энергию, достаточную для перевода γ'_s до уровня удельной энергии свободной поверхности γ_s . В этом случае критерий разрушения можно записать в виде [8]

$$\sigma - \frac{\rho T}{\mu} \Delta S_{\text{стр}} \geq \frac{\Delta \gamma_s}{a_{\text{р}}}, \quad (1)$$

где σ — растягивающее напряжение; ρ, μ — плотность и молярная масса материала; $\Delta S_{\text{стр}}$ — структурная (конфигурационная) энтропия,

$\text{Дж/моль}\cdot\text{К}$; $\frac{\rho T}{\mu} \Delta S_{\text{стр}}$ — деформационное упрочнение; $\Delta \gamma_s = \gamma_s - \gamma'_s$ — изменение удельной поверхностной энергии границы при преобразовании ее в трещину; $a_{\text{р}}$ — среднее расстояние между атомами через границу.

Вследствие вероятностного характера значения γ'_s при выполнении расчетов напряжений, приводящих к разрушению, может быть допущена ошибка, которая связана с тем, что величина γ'_s изменяется в пределах от нуля (когда границы практически не существует) и до значений γ_s (когда на месте границы появляется трещина).

Таким образом, $0 \leq \gamma \leq 1$, где $\gamma = \gamma'_s / \gamma_s$. Можно полагать, что совокупность относительных поверхностных энергий γ может быть представлена в виде некоторой плотности распределения $p(\gamma)$. Как большинство природных вероятностных величин, значение γ может быть описано нормальным законом с математическим ожиданием $M(\gamma) = 0,5$. Обычно для оценочных расчетов рекомендуется принимать $\gamma'_s = \Delta \gamma_s = 0,5 \gamma_s$ [10, 11]. Однако нарушение симметрии распределения $p(\gamma)$, что может быть следствием пластической или термической обработки материала, приводит к возможности увеличения или уменьшения значений γ , а значит, к снижению или повышению прочности металла.

Возникновение низкоэнергетических «специальных» границ, малоугловых границ во время горячей пластической деформации при высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО) или уменьшение угла разориентации соседних зерен при их измельчении приводят

к увеличению значения $\frac{\Delta \gamma_s}{a_{\text{р}}}$ и к повышению

прочности металла. Экспериментально это фиксируется как повышение истинного сопротив-

ления разрушению σ_p . Напротив, увеличение углов разориентации зерен и значения γ'_s , характерное для литых и крупнозернистых металлов, у которых на межзеренных или межфазных границах присутствуют сегрегации примесных атомов, приводит к уменьшению значений σ_p . Нельзя, однако, полагать, что различные методы обработки способны сильно изменить симметрию распределения $p(\gamma)$. Поэтому, воспользовавшись гипотезой о симметричном распределении, будем в оценочных расчетах прочностных характеристик металлов полагать математическое ожидание $M(\gamma) = 0,5$.

В формулу критерия разрушения (1) входит значение $a_{\text{р}}$, которое интерпретируется как среднее расстояние между атомами через межзеренную или межфазную границу. Можно предположить для простоты оценок, что для кубической кристаллической решетки $a_{\text{р}} \approx 1,1a$, где a — параметр решетки, т. е. на границе и в зерне эти значения не очень отличаются друг от друга. Подобный подход близок по сути к положениям работы [12], где используется понятие «свободного объема» на границе.

Сравним расчетные и экспериментальные данные по величине разрушающих напряжений для одноосного растяжения. Во время испытаний выполняется условие пластичности $\sigma = \sigma_s$, в котором напряжения σ_s определяются струк-

турой металла: $\sigma_s = \frac{\rho T}{\mu} \Delta S_{\text{стр}}$, причем конфигурационная (структурная) энтропия $\Delta S_{\text{стр}}$ является интегрально-вероятностной характеристикой структуры [8, 9]. Тогда при растяжении

$$\sigma \geq \frac{\Delta \gamma_s}{2a_{\text{р}}}. \quad (2)$$

Разрушению металла при растяжении предшествует образование шейки, поэтому условие разрушения (2) следует записывать в виде

$$\sigma_p \geq \frac{\Delta \gamma_s}{2a_{\text{р}}}, \quad (3)$$

где σ_p — значение истинных напряжений в месте разрыва, $\sigma_p = \frac{\sigma_k}{1-\psi}$; σ_k — условные напряжения при разрыве образца; ψ — относительное сужение шейки в месте разрыва образца.



Выражение (1) действительно, если происходит межзеренное разрушение. В том случае, когда слабым звеном, вдоль которого развивается разрушение, является тело зерна, критерий сводится к виду

$$\sigma_p \geq \frac{\gamma_s}{2c}, \quad (4)$$

где c — расстояние между кристаллографическими плоскостями, вдоль которых происходит разрушение (скол). Для бериллия слабое звено — совокупность плоскостей (0001), которая имеет минимальное значение поверхностной энергии ($\gamma_s = 0,232 \text{ Дж}/\text{м}^2$) и максимальное межплоскостное расстояние ($c = 0,358 \text{ нм}$).

Результаты расчета разрушающих напряжений и экспериментальные значения истинного сопротивления разрыву при испытаниях некоторых металлов на растяжение сведены в табл. 1. Значения σ_b , ψ , γ_s взяты из справочников.

Известно, насколько велик бывает разброс экспериментальных значений σ_b , σ_k , ψ для металлов в зависимости от химического состава (чистоты материала), условий эксперимента, качества изготовления образцов и других факторов. Поэтому цифры, приведенные в табл. 1 для указанных характеристик металлов, носят весьма усредненный характер. Тем не менее сходимость расчетных и экспериментальных данных в табл. 1 может считаться удовлетворительной. Таким образом, критерии разрушения (2)–(4) вполне работоспособны.

Критерии разрушения (1)–(4) отражают влияние свойств материала — его поверхностной энергии γ_s , которая зависит от модуля упругости, коэффициента Пуассона и параметра решет-

ки $\gamma_s = \frac{Ea}{4\pi(1-\nu^2)}$, учитывают особенности исход-

ной структуры и механизмов деформационного упрочнения. Очень важно, что в рассмотренных критериях присутствует «слабое звено» в виде границы с наименьшим значением барьера раз-

рушения $\frac{\Delta\gamma_s}{a_{rp}}$. Согласно этим критериям разру-

шение в металле должно происходить вдоль границ с максимальной поверхностной энергией, для которых $\Delta\gamma_s = \gamma_s - \gamma'_s = \min$, и с максимальным межатомным расстоянием $a_{rp} = \max$.

Критерии (1)–(4) работают только в условиях одноосного растяжения, в то время как на пластичность металлов влияют как схема деформации, определяющая величину гидростатических напряжений, так и неравномерность деформаций в реальных процессах обработки давлением.

Влияние схемы напряженно-деформированного состояния

Влияние гидростатических напряжений изучали во многих работах, в том числе в [13, 14], для чего были созданы специальные установки, обеспечивающие деформацию растяжением при наложении высоких гидростатических давлений. В результате этих работ появилась математическая, а затем феноменологическая теория разрушения металлов в процессах обработки давлением. Они показали благоприятное влияние сжимающих гидростатических напряжений на повышение пластичности, но без учета особенностей структуры металлов и неравномерности деформации.

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения разрывных напряжений σ_p

Металл	$\gamma_s, \text{Дж}/\text{м}^2$	$\Delta\gamma_s, \text{Дж}/\text{м}^2$	$a_{rp}, \text{нм}$	$\Delta\gamma_s/a_{rp}, \text{МПа}$	$\sigma_{-1}^{\text{расч}}, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\psi, \%$	$\sigma_{-1}^{\text{эксп.}}, \text{МПа}$	Относ. откл., %
Be*	0,232	0,232	0,358	647	323,5	300	5	315	3
Al	1,04	0,52	0,405	1167	583	85	85	566	2,9
Ti*	1,4	0,7	0,382	1835	917,5	560	40	933	1,7
Fe	1,48	0,74	0,287	2340	1170	370	70	1230	5,1
Ni	1,44	0,72	0,352	1860	930	400	60	1000	7,5
Cu	1,12	0,56	0,362	1400	700	230	70	760	8,5

*) Расчет выполнен для плоскости базиса металлов



Для оценки влияния схемы напряженно-деформированного состояния на пластичность используем концепцию, рассмотренную в [8, 9], и критерии (1)–(3).

Будем считать, что напряжения, действующие в металле в поперечных направлениях при одновременном растяжении, равны нулю: $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = 0$. Для этого случая условие пластичности по 4-й (энергетической) теории прочности, имеющее вид

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_s^2, \quad (5)$$

преобразуется к виду

$$\sigma_1 = \sigma_s. \quad (6)$$

Для плоской деформации выражение (5) может быть записано в виде

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s, \quad (7)$$

где $1,0 \leq \beta \leq \frac{2}{\sqrt{3}}$.

Будем исходить из предположения, что связь между знаком деформирующего напряжения и деформацией неразрывна, т. е. вытяжка металла, например при прокатке, обусловлена результатирующими растягивающими напряжениями σ_3 . В работах [8, 9] положительными считаются растягивающие напряжения, т. е. при прокатке поперечные напряжения $\sigma_3 > 0$, а нормальные к плоскости листа — $\sigma_1 < 0$. В этом случае условие пластичности (7) сводится к обычному условию равновесия

$$\Sigma\sigma = 0. \quad (8)$$

Момент перехода от упругой деформации к пластической наступает, когда сумма действующих в данном объеме напряжений σ_1 и σ_3 , противоположных по знаку, достигнет значений внутренних напряжений (или с учетом коэффициента β чуть больших).

Пластическая деформация при любой схеме нагружения заканчивается при разрушении металла, что происходит, когда значение растягивающих напряжений превысит критическое, которое можно определить при помощи критерия разрушения (1)–(3), записываемого при условии действия сжимающих напряжений в виде

$$\sigma_p = (\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{\rho T}{\mu} \Delta S_{crp} \geq \frac{\Delta\gamma_s}{a_{rp}}$$

или

$$\sigma_p = \sigma_3 \geq \frac{\Delta\gamma_s}{2a_{rp}} + \sigma_1. \quad (9)$$

Таким образом, появление дополнительных сжимающих напряжений σ_1 в рассматриваемой точке приводит к повышению потенциального барьера разрушения, а разрушение происходит под действием растягивающих напряжений σ_3 .

Если для описания кривой истинных напряжений $\sigma(\varepsilon)$ использовать аппроксимацию

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_{t0} + \alpha\varepsilon^\beta, \quad (10)$$

то в момент разрушения $\varepsilon \equiv \varepsilon_{\text{пред } 0}$, а $\sigma_3 \equiv \sigma_p$. Тогда пластичность при растяжении без наложения гидростатических напряжений можно вычислить по соотношению

$$\varepsilon_{\text{пред } 0} = \left(\frac{\sigma_p - \sigma_{t0}}{\alpha} \right)^{1/\beta},$$

а с наложением гидростатического давления σ_1 — по соотношению

$$\varepsilon_{\text{пред } i} = \left(\frac{\sigma_p + \sigma_1 - \sigma_{t0}}{\alpha} \right)^{1/\beta}. \quad (11)$$

В безразмерном виде в предположении, что предел текучести много меньше напряжений в момент разрыва в шейке, $\sigma_{t0} \ll \sigma_p$, получим

$$\frac{\varepsilon_{\text{пред } i}}{\varepsilon_{\text{пред } 0}} = \left(1 + \frac{\sigma_1}{\sigma_p} \right)^{1/\beta}. \quad (12)$$

Численная оценка влияния сжимающих напряжений σ_1 представлена на рис. 1, где показана безразмерная зависимость пластичности $\varepsilon_{\text{пред } i}/\varepsilon_{\text{пред } 0}$ ($\varepsilon_{\text{пред } i}$ — пластичность при действии сжимающих гидростатических напряжений σ_1 ; $\varepsilon_{\text{пред } 0}$ — пластичность в исходном состоянии) от напряжений σ_1/σ_p , где напряжения σ_p — предел прочности при одноосном растяжении. Видно, что повышение пластичности материалов под действием сжимающих напряжений существенно, а расчетные зависимости (рис. 1, б) очень близки к экспериментальным результатам (рис. 1, а), взятым из [13].

Безразмерные зависимости пластичности от гидростатических сжимающих напряжений σ_1 имеют почти линейный характер и достаточно близки для различных материалов. Отметим, что для многих материалов коэффициенты аппроксимации в для соотношения (10) находятся именно в пределах 0,6–0,7 (например, для меди — $\beta = 0,65$ –0,7, для низко- и среднеуглеродистых легированных сталей — $\beta = 0,55$ –0,7). Анализ по-

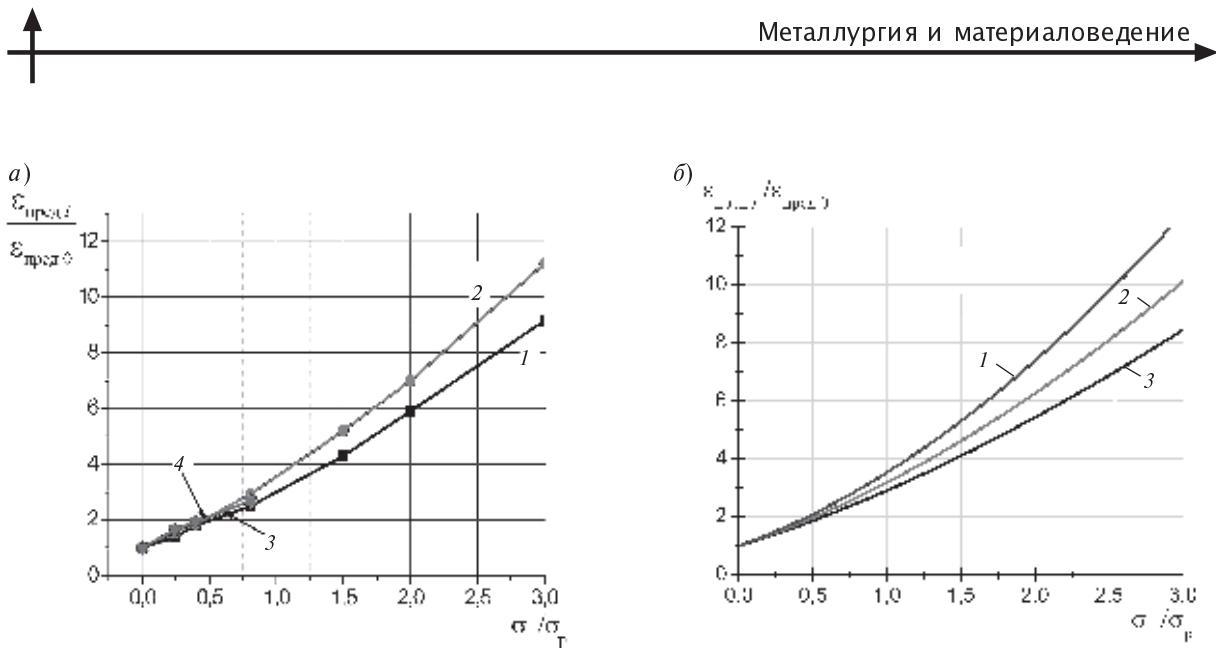


Рис. 1. Изменение пластичности металлов
при действии гидростатических сжимающих напряжений σ_{pi}/σ_{p0} :
а — по данным эксперимента, 1 — медь; 2 — ст.40Х; 3 — ст.30 по данным [20], 4 — ст.40ХНМА;
б — расчет по (11) для различных значений коэффициента в (1 — 0,55; 2 — 0,6; 3 — 0,65)

казывает, что расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что критерий разрушения (9) способен учитывать влияние сжимающих гидростатических напряжений на повышение пластичности материалов.

Влияние неравномерности деформации и внутренних напряжений

Неравномерным нагружением будем называть такое, при котором внешние напряжения непостоянны по сечению металла, т. е. $\sigma = \sigma(x, y, z)$. Рассмотрим одну из наиболее известных схем нагружения — холодную прокатку тонкого листа. Пусть $\sigma_y = \sigma_y(x)$ (рис. 2). Текущее значение высоты полосы в очаге деформации $h = y = h_0 + x^2/2R$, где h_0 — высота полосы при $x = 0$; R — радиус прокатного валка. Рассматриваемый объем металла — $v = xyz$.

Допустим, что общее изменение энергии системы W при взаимодействии с деформирующим инструментом связано лишь с изменением напряжений от действия внешних сил: $W = \sigma v$. Используя соотношение Гельмгольца [6, 7], запишем общее изменение напряжений в системе в виде

$$\frac{\partial W}{\partial v} = \frac{\partial}{\partial v}(\sigma v) = \frac{\partial}{\partial(xyz)}[\sigma(x)xyz]. \quad (13)$$

С учетом $h = y = h_0 + x^2/2R$, а также полагая, что $\sigma(z, y) = \text{const}$, выражение (13) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= \frac{z}{yz} \frac{\partial}{\partial x} \left[\sigma(x)(h_0 + x^2/2R)x \right] = \\ &= \frac{1}{y} \left[\left(h_0x + x^3/2R \right) \frac{d\sigma}{dx} + \sigma \left(h_0 + 3x^2/2R \right) \right] = \\ &= \frac{1}{h} h_0 x \frac{d\sigma}{dx} + \frac{1}{h} \frac{d\sigma}{dx} \frac{x^3}{2R} + \sigma(h_0/h) + \sigma(3x^2/2Rh). \end{aligned}$$

Ввиду незначительности изменения h по высоте очага деформации при прокатке металла с малыми единичными обжатиями можно предположить, что $h \approx h_0$. Кроме того, вторым и четвертым слагаемыми последнего выражения можно пренебречь из-за их малости по сравнению с остальными. Тогда

$$\frac{\partial W}{\partial v} = x \frac{d\sigma}{dx} + \sigma. \quad (14)$$

Как видно, в выражении (14) появляются напряжения, связанные со скоростью изменения напряжений вдоль очага деформации. Отметим,

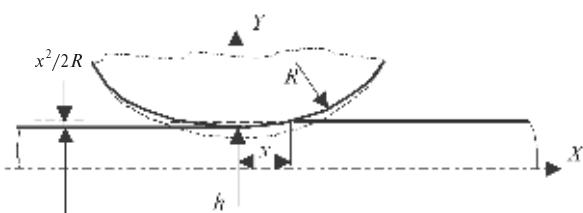


Рис. 2. К выводу критерия разрушения при прокатке тонкого листа

что учет этих производных при расчете напряженно-деформированного состояния — дело обычное. Например, в [15] при расчете напряжений, возникающих при сжатии полосы между шероховатыми плитами, в предположении выполнения гипотезы плоских сечений в цилиндрической системе координат получено выражение, в котором также участвуют напряжения с производной по координате:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{dp} + (\sigma_p - \sigma_\theta) + \frac{2\tau_{p\theta}}{\alpha} = 0.$$

На необходимость учета производных и зависящих от них напряжений указывал еще И. Ньютон. Напряжения, зависящие от производных типа $x \frac{d\sigma}{dx}$, Р. Хилл [16] по аналогии

с Ньютоном называет «флюксиями», причем они характеризуют крутизну эпюры напряжений по очагу деформации. Как будет показано далее, эти напряжения в ряде случаев играют существенную роль в процессах разрушения при пластической деформации, особенно для высокомодульных материалов. Таким образом, выражение (14) показывает, что в процессах разрушения играют роль не только растягивающие напряжения, но и неравномерность напряжений. До настоящего времени в процессах разрушения металлов практически никто не учитывал неравномерность напряжений и ее роль в формировании пластических свойств металла.

Когда говорят о неравномерности деформации, то обычно имеют в виду остаточные явления в деформированном металле [17]. Исследования по неравномерности деформации основываются на экспериментальных данных и зачастую лишь констатируют, что эти напряжения, по мнению В.С. Смирнова, могут достигать «очень больших значений» [15] и вызывать разрушение материала. Заметим, что отсутствие методик расчета этих напряжений не позволяет в ряде случаев определить причину разрушения металла в той или иной технологической операции и устраниить ее.

При условии $x \frac{d\sigma}{dx} \rightarrow \infty$ фактически реали-

зуется действие силы, сосредоточенной в точке. При такой «игольчатой» схеме нагружения пластическая деформация металла представляет со-

бой разрушение срезом, точнее, деформацию невозможно отличить от разрушения срезом. При $x \frac{d\sigma}{dx} \rightarrow 0$ происходит деформация металлической пластины между двумя плоскогардильными плитами. При этом металл имеет наибольший ресурс пластичности по сравнению со схемами, в которых присутствуют неравномерности деформации.

Учитывая, что при прокатке бериллиевой фольги трещина преимущественно развивается поперек направления прокатки, т. е. вдоль действия напряжений σ_x , критерий разрушения (1) можно записать в виде

$$\sigma_x + x \frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{\rho T}{\mu} \left(\Delta S_{\text{стР}} + x \frac{d\Delta S_{\text{стР}}}{dx} \right) \geq \frac{\Delta \gamma_s}{a_{\text{рР}}}, \quad (15)$$

где $\frac{\rho T}{\mu} x \frac{d\Delta S_{\text{стР}}}{dx}$ — напряжения от неравномерности деформационного упрочнения (неравномерность предела текучести) в очаге деформации.

При анализе соотношений (1) может возникнуть вопрос об инвариантности определения напряжений, зависящих от $x \frac{d\sigma}{dx}$, в связи с различ-

ным значением x при переносе осей координат. Однако этот вопрос снимается, поскольку координата x может быть интерпретирована как радиус-вектор, а очаг деформации при прокатке тонкой ленты и фольги фактически симметричен относительно значения $x = 0$.

Особенно важно отметить, что напряжения σ и $x \frac{d\sigma}{dx}$ при прокатке противоположны по знаку, и если σ — сжимающие и препятствуют разрушению, то $x \frac{d\sigma}{dx}$ — растягивающие и способству-

ют образованию трещин. На рис. 3 представлена зависимость эпюры контактных напряжений σ_x при прокатке бериллиевой фольги с малыми обжатиями, рассчитанная путем решения упруго-пластической задачи [18]. В дальнейшем будет показано, что напряжения от неравномерности деформации в ряде случаев по величине могут быть сопоставимы и даже превышать сжимающие σ . Следовательно, для обеспечения воз-



можности применения критериев разрушения (15) при холодной прокатке необходимо иметь достоверную информацию о распределении напряжений по очагу деформации $\sigma(x, y, z)$.

При холодной прокатке тонкой ленты с небольшими единичными обжатиями можно предположить, что напряжения от неравномерности

деформационного упрочнения $-\frac{\rho T}{\mu} x \frac{d\Delta S_{\text{ctrp}}}{dx}$

малы по сравнению с остальными компонентами критерия (15). Кроме того, полагая, что напряжения σ — сжимающие, а в каждый момент деформации выполняется условие пластиично-

сти $\sigma_i = \sigma_s = \frac{\rho T}{\mu}$, критерий разрушения (15) мож-

но записать в виде

$$x \frac{d\sigma}{dx} \geq \frac{\Delta\gamma_s}{a_{\text{rp}}} \quad (16)$$

Напряжения $x \frac{d\sigma}{dx}$ при прокатке достигают

максимальных значений при входе металла в очаг деформации или по выходе из него, когда и производная, и координата x максимальны. В центре симметричного очага напряжения

$x \frac{d\sigma}{dx} \rightarrow 0$, поэтому можно сделать вывод о том,

что критерий (15) описывает разрушение металла в крайних зонах очага деформации.

Согласно положениям, высказанным в разделе «Влияние схемы напряженно-деформированного состояния», действие сжимающих напряжений σ_y в очаге деформации играет положительную роль в торможении разрушения непосредственно в очаге деформации. При выходе из очага деформации и снятии деформирующих напряжений в металле остается неравномерность упрочнения металла, т. е. неравномерность распределения предела текучести металла, и тогда условие разрушения (16) преобразуется к виду

$$-\frac{\rho T}{\mu} \left(\Delta S_{\text{ctrp}} + x \frac{d\Delta S_{\text{ctrp}}}{dx} \right) \geq \frac{\Delta\gamma_s}{a_{\text{rp}}},$$

или

$$\sigma_{\text{tr}} + x \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{dx} \geq \frac{\gamma_s}{c} \quad (17)$$

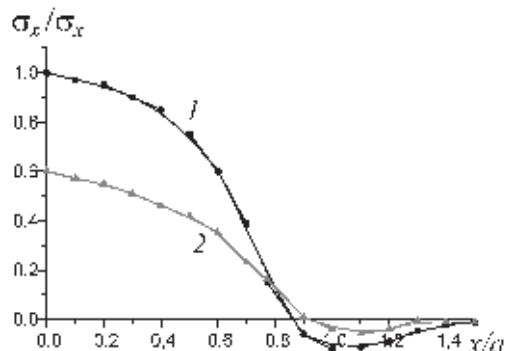


Рис. 3. Характер эпюры напряжений $\sigma_x/\sigma_{x\max}$ при прокатке фольги из берилля вблизи поверхности (1) и в середине металла по толщине (2)

С учетом неравномерности деформации и упрочнения по всем трем направлениям выражение (17) примет вид

$$\sigma_{\text{tr}} + x \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{dx} + y \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{dy} + z \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{dz} \geq \frac{\Delta\gamma_s}{a_{\text{rp}}} \quad (18)$$

Как видно, основную роль в разрушении берилля, если оно происходит вне очага деформации, начинают играть неравномерности упрочнения, неравномерности деформации полосы. Заметим, что многолетняя практика прокатки малопластичных металлов показала, что именно неравномерность деформации полосы оказывает негативное влияние на технологическую пластичность металла.

Если полагать, что $\frac{dx}{x} = d\varepsilon_x$, $\frac{dy}{y} = d\varepsilon_y$, $\frac{dz}{z} = d\varepsilon_z$,

то критерий разрушения берилля, обусловленного неравномерностью деформаций, принимает вид

$$\sigma_{\text{tr}} + \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{d\varepsilon_x} + \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{d\varepsilon_y} + \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{d\varepsilon_z} \geq \frac{\Delta\gamma_s}{a_{\text{rp}}} \quad (19)$$

где величину деформаций $d\varepsilon$ следует рассматривать как неравномерность деформаций полосы по осям. В выражении (19) влияние неравномерности деформации (или деформационного упрочнения) в виде $\frac{d\sigma_x}{d\varepsilon} \geq \dots$ аналогично критерию устойчивости пластической деформации (см., например, [19]).

Влияние неравномерности деформации значительно возрастает при прокатке бериллиевой

Таблица 2

Результаты расчетов условий разрушения при прокатке бериллиевой фольги

$\varepsilon, \text{мм}$	$\sigma_t, \text{МПа}$	$x \frac{d\sigma_x}{dx}, \text{МПа}$	$\sigma_{\Sigma}^*, \text{МПа}$	$\sigma_{\Sigma}^{**}, \text{МПа}$
0,18	-153,7	80,4	-569,6	-1519,6
0,21	-134,8	132,3	-517,7	-1467,7
0,24	-105,4	235,2	-414,8	-1364,8
0,27	-57,5	431,1	-218,9	-1168,9
0,3	+80,1	1376	726 \otimes	-224

фольги, поскольку данный металл имеет, как было показано выше, существенно слабое звено в виде спайности по плоскости базиса

$$\frac{\Delta\gamma_s}{a_{rp}} = \frac{\gamma_{s0001}}{c} \approx 650 \text{ МПа}, \text{ для которого критерий}$$

(19) может быть переписан в виде

$$\sigma_t + \frac{d\sigma_t}{d\varepsilon_x} + \frac{d\sigma_t}{d\varepsilon_y} + \frac{d\sigma_t}{d\varepsilon_z} \geq \frac{\gamma_{s0001}}{c}. \quad (20)$$

В качестве подтверждения работоспособности критерия (16) и вытекающего из него условия (20) можно привести табл. 2, в которой рассмотрен один из режимов прокатки бериллиевой фольги. Согласно изложенным ранее положениям разрушение происходит при условии, если $\sigma_{\Sigma} \geq 0$. В таблице даны два варианта значений σ_{Σ} :

первый — σ_{Σ}^* — при теоретической прочности слабого звена для плоскости базиса, $\Delta\gamma_s/a = \gamma_{s0001}/c = 650 \text{ МПа};$

второй — σ_{Σ}^{**} — при теоретической прочности слабого звена, приравненной к прочности среднестатистической границы, $\Delta\gamma_s/a_{rp} = 1600 \text{ МПа}.$

В первом варианте возможен разрыв металла вдоль плоскости базиса, что при прокатке фольги может привести к потере ее вакуумной плотности; макроразрушения фольги может и не происходить. Во втором варианте должно произойти макроразрушение полосы. Возможность разрушения в таблице помечена знаком \otimes . При расчете приняты следующие параметры: модуль упругости прокатных валков $E_b = 200 \text{ ГПа}$, радиус валков $r_b = 50 \text{ мм}$, полудлина очага деформации $a = 0,3 \text{ мм}$, толщина прокатываемой фольги $h = 0,1 \text{ мм}$, обжатие при прокатке $\varepsilon = 0,8 \text{ мкм}.$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плювинаж, Г. Механика упругопластического разрушения [Текст] / Г. Плювинаж; пер. с франц.— М.: Мир, 1993.— 450 с.
2. Витвицкий, П.М. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел [Текст] / П.М. Витвицкий, С.Ю. Попина.— Киев: Наукова Думка, 1980.— 187 с.
3. Владимиров, В.И. Физическая природа разрушения металлов [Текст] / П.М. Витвицкий.— М.: Металлургия, 1984.— 280 с.
4. Бернштейн, М.Л. Структура и механические свойства металлов [Текст] / М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский.— М.: Металлургия, 1970. 472 с.
5. Бериллий. Наука и технология [Текст] / Под ред. Д. Вебстера; пер. с англ. под ред. Г.Ф. Тихинского и И.И. Папирова.— М.: Металлургия, 1984.— 624 с.
6. Папиров, И.И. Получение и свойства мелкозернистого бериллия [Текст] / И.И. Папиров,
- И.А. Тараненко, Г.Ф. Тихинский // Атомная энергия. 1974. Т. 37, вып. 3.— С. 220—223.
7. Костылев, Ф.А. Получение и свойства высококористого бериллия с микроячеистой структурой [Текст] / Ф.А. Костылев, В.В. Горлевский, М.Д. Сенин [и др.] // Неорганические материалы.— 1995. Т. 31. № 4.— С. 479—482.
8. Колбасников, Н.Г. Теория обработки металлов давлением. Сопротивление деформации и пластичность [Текст] / Н.Г. Колбасников.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2000. 320 с.
9. Колбасников, Н.Г. Энтропия. Структура, Фазовые превращения и свойства металлов [Текст] / Н.Г. Колбасников, С.Ю. Кондратьев.— СПб.: Наука, 2006.— 360 с.
10. Миссол, В. Поверхностная энергия раздела фаз в металлах [Текст] / В. Миссол; пер. с польск.— М.: Металлургия, 1978.— 176 с.
11. Орлов, А.Н. Границы зерен в металлах



[Текст] / А.Н. Орлов, В.Н. Переверзенцев, В.В. Рыбин.— М.: Металлургия, 1980. 154 с.

12. Чувильдеев, В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения [Текст] / В.Н. Чувильдеев.— М.: Физматлит, 2004.— 304 с.

13. Колмогоров, В.Л. Пластичность и разрушение [Текст] / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев.— М.: Металлургия, 1977.— 336 с.

14. Богатов, А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением [Текст] / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов [и др].— М.: Металлургия, 1983.— 240 с.

15. Смирнов, В.С. Теория прокатки [Текст] / В.С. Смирнов.— М.: Металлургия, 1967.— 460 с.

16. Хилл, Р. Математическая теория пластичности [Текст] / Р. Хилл; пер. с англ.— М.: ГИТТЛ, 1956.— 640 с.

17. Вишняков, Я.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах [Текст] / Я.Д. Вишняков, В.Д. Пискарев.— М.: Металлургия, 1989.— 254 с.

18. Фомин, С.Г. Физико-механический анализ течения труднодеформируемых металлов и разработка на его основе режимов холодной прокатки фольг [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук / С.Г. Фомин / ЛПИ.— Л., 1984.— 252 с.

19. Грабский М. Структурная сверхпластичность металлов [Текст] / М. Грабский; пер. с польск.— М.: Металлургия, 1975.— 186 с.

20. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением [Текст] / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин.— М.: Металлургия, 1973.— 223 с.

УДК 621.74.01:669.14.018

В.Ш. Суфияров, В.М. Голод

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОЛОГИИ ФРОНТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Структурные характеристики литого металла, полученного затвердеванием расплава, важны не только для фасонных отливок, но и для слитков, подвергающихся дальнейшей термической и пластической обработке. Процессы кристаллизации определяют размеры и морфологию структуры, которые в конечном счете влияют на механические и эксплуатационные свойства литого материала.

Моделирование процесса затвердевания сплавов, являющееся эффективным инструментом современного металловедения, вовлекает в рассмотрение значительное число влияющих факторов, в частности теплофизические и физико-химические параметры процесса — коэффициент распределения, интервал кристаллизации, наклон ликвидуса и другие характеристики материала в различных фазовых состояниях. Учет их совокупного влияния на процесс кристаллизации обеспечивает возможность адекватного прогнозирования структуры и управления ее формированием.

В работе рассмотрены три возможных морфологических типа кристаллизации металла

(плоский фронт, ячеистая и дендритная кристаллизации) с целью расчета параметров того или иного режима кристаллизации и определения условий перехода одного типа кристаллизации в другой (плоский фронт → ячеистая структура → дендритная структура).

Из теории и практики формирования структуры бинарных сплавов известно, что их морфология определяется соотношением двух параметров — температурного градиента G в расплаве и скорости перемещения фронта кристаллизации V , а критический параметр $(G/V)_{kp}$ определяет условие перехода от плоского фронта к ячеистой и дендритной структуре [1, 2]. Вместе с тем определяющими технологическими параметрами, диктующими характер дендритной и ячеистой микроструктуры (размеры междуосных промежутков первого λ_1 и второго λ_2 порядка), являются, как свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные [1–4 и др.], локальная продолжительность затвердевания и/или скорость охлаждения, которые лишь косвенно связаны с параметрами G и V . Для оценки их роли в формировании литой структуры важно учиты-

вать, что в условиях литья значения параметров G и V свою очередь находятся в прямой зависимости от интенсивности теплоотвода [5].

Расчет численных значений температурного градиента G , скорости кристаллизации V и критического параметра $(G/V)_{kp}$ для условий перехода от плоского фронта к ячеистой и дендритной структуре применительно к низкоуглеродистым сталим рассмотрен с целью выявления металлургических и технологических факторов, позволяющих управлять условиями затвердевания и морфологией формирующейся структуры. Моделирование затвердевания сплавов произведено с помощью аналитического расчета температурных полей при формировании фронта кристаллизации расплавов в зависимости от их состава и начальных условий при заданных параметрах теплообмена.

Для расчета критического параметра, характеризующего устойчивость плоского фронта, применена классическая формула [1]

$$\frac{G}{V} \geq -\frac{pC_0(1-k)}{kD_L}, \quad (1)$$

где C_0 — концентрация второго компонента; p — наклон линии ликвидуса; k — коэффициент распределения; D_L — коэффициент диффузии в жидкой фазе. Приведенная формула получена для бинарных расплавов, поэтому для учета влияния ряда компонентов стали на термокинетические параметры G и V использовано аддитивное соотношение, учитывающее вклад парного взаимодействия i -х компонентов с основой сплава:

$$\frac{G}{V} \geq \sum \frac{p_i(C_0)_i(1-k_i)}{k_i(D_L)_i}. \quad (2)$$

Результаты расчета для исследованной низкоуглеродистой стали ($0,05\% C; 0,18\% Si; 0,99\% Mn; 0,10\% Nb; 0,08\% Cr; 0,48\% Ni$) представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, относительные (на 1%) и абсолютные вклады отдельных компонентов в изменение значения критического параметра $(G/V)_{kp}$ весьма различаются, причем определяющим является влияние углерода, отличающегося наиболее высоким значением p_c и низким значением k_c .

Для оценки возможности кристаллизации плоского фронта в условиях заливки расплава в металлическую форму были рассчитаны скорость кристаллизации V , температурный градиент G и их отношение G/V , а затем произведено сравнение значений критического параметра $(G/V)_{kp}$ с расчетным отношением G/V . Для определения скорости кристаллизации V использовано соотношение $V = 0,5m / \sqrt{\tau}$ [6], где τ — время после начала процесса кристаллизации, m — коэффициент затвердевания. Приведенная формула описывает затвердевание полупространства, т. е. соответствует рассматриваемым условиям плоской отливки неограниченной толщины, которые использованы при выводе уравнения (1). Для вычисления m решено трансцендентное уравнение [6]

$$L\rho_2 \frac{\sqrt{\pi}}{2} m = \frac{b_2(T_{kp} - T_0) \exp\left(-\frac{0,25m^2}{a_2}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{0,5m}{\sqrt{a_2}}\right)}$$

Таблица 1

Вклад компонентов стали в изменение морфологии фронта кристаллизации

Система	$(C_0)_i$, % ввес.	k_i	p_i , K/%	$(D_L)_i \cdot 10^9$, $\text{м}^2/\text{с}$	$\frac{p_i(1-k_i)}{k_i(D_L)_i} \cdot 10^{-8}$, $\text{K} \cdot \text{с}/(\% \cdot \text{м}^2)$	$\Sigma \{(G/V)_{kp}\}_i \cdot 10^{-8}$, $\text{K} \cdot \text{с}/\text{м}^2$
Fe—C	0,05	0,19	87	7,8	475	26,0
Fe—Si	0,18	0,77	11	4,2	8,0	27,4
Fe—Mn	0,99	0,76	5,1	4,7	3,0	30,8
Fe—Nb	0,10	0,40	9,0	5,7	24	33,2
Fe—Ni	0,48	0,83	3,9	4,1	2,0	34,1
Fe—Cr	0,08	0,95	1,6	3,2	0,3	34,1



$$-b_1(T_{\text{н}} - T_{\text{кр}}) \frac{\exp\left(-\frac{0,25m^2}{a_1}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0,5m}{\sqrt{a_1}}\right)}, \quad (3)$$

где $T_{\text{кр}}$ — температура кристаллизации расплава (согласно диаграмме состояния); T_0 — температура на внешней поверхности затвердевающего перегретого расплава; $T_{\text{н}}$ — начальная температура расплава, $b_j = \sqrt{\lambda_j c_j \rho_j}$ — коэффициент тепловой аккумуляции расплава ($j = 1$) и твердой корки ($j = 2$); ρ , c и λ — соответственно их плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность.

Вычисление градиента температуры G в расплаве перед фронтом кристаллизации в зависимости от начальной температуры расплава и времени после начала кристаллизации произведено

с помощью соотношения $G = \frac{\partial T_L}{\partial x}$ при $x = x_{\text{кр}}$ [6]:

$$T_L = T_{\text{н}} - (T_{\text{н}} - T_{\text{кр}}) \times \\ \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0,5x}{\sqrt{a_1 \tau}} \right) \right] / \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0,5m}{\sqrt{a_1}} \right) \right], \quad (4)$$

где x — координата, отсчитываемая от внешней поверхности затвердевающего расплава; $x_{\text{кр}} = m\sqrt{\tau}$ — толщина затвердевшего слоя.

Расчет произведен для условий затвердевания при различной начальной температуре ($T_{\text{кр}} = 1808$ К) и температуре внешней поверхности $T_0 = 900$ К (металлическая форма). Сравнительные результаты расчетов для ряда вариантов представлены в табл. 2.

Сопоставление величины отношения G/V при затвердевании в металлической форме (табл. 2) с критическим значением $(G/V)_{\text{кр}}$ для исследуемого сплава (табл. 1) показывает, что в рассматриваемых условиях кристаллизация плоского фронта без резкого повышения интенсивности теплоотвода трудно осуществима, поскольку значения G/V намного больше величины соответствующего критического параметра $(G/V)_{\text{кр}}$ для низкоуглеродистой стали. Этот результат находится в согласии с практикой кристаллизации стали при непрерывном литье, гделитой металл, как правило, имеет дендритную морфологию.

Расчет критических условий перехода «ячеистый фронт \rightarrow дендритный фронт» был произведен с целью оценки возможности получения ячеистой структуры при интенсификации условий кристаллизации сплавов. Возникновение дендритной морфологии фронта кристаллизации рассматривают как развитие структурного перехода от плоского фронта к ячеистому при дальнейшем накоплении примеси в расплаве с возникновением концентрационного переохлаждения.

Авторы работы [7] принимают, что ячеистая морфология фронта кристаллизации (рис. 1, а) формируется, если расчетное расстояние λ_2 от вершины до места возникновения боковых ветвей превышает длину области смыкания соседних стволов λ_0 ; в противном случае возникает дендритная морфология с междуосными промежутками λ_2 (рис. 1, б).

На основе результатов работы [7] получено выражение для оценки величины начальных междуосных промежутков дендритов при кристаллизации многокомпонентного сплава [8]:

$$\frac{VR^2}{\Gamma} \sum \frac{p_i(1-k_i)(C_0)_i}{(D_L)_i} =$$

Таблица 2

Скорость кристаллизации и градиент температуры при затвердевании низкоуглеродистой стали

$T, \text{К}$	$m \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{с}^{0,5}$	$\tau, \text{с}$	$x, \cdot 10^3, \text{м}$	$V \cdot 10^4, \text{м}/\text{с}$	$G, \text{К}/\text{м}$	$(G/V) \cdot 10^{-4}, \text{К} \cdot \text{с}/\text{м}^2$
1810	4,48	1	4,4	22,4	1120	50
1810	4,48	10	14,2	7,1	450	64
1850	4,27	1	4,3	21,4	23500	1100
1850	4,27	10	13,5	7,1	9290	1300
1908	4,03	1	4,0	20,1	55400	2750
1908	4,03	10	12,7	6,4	21400	3360

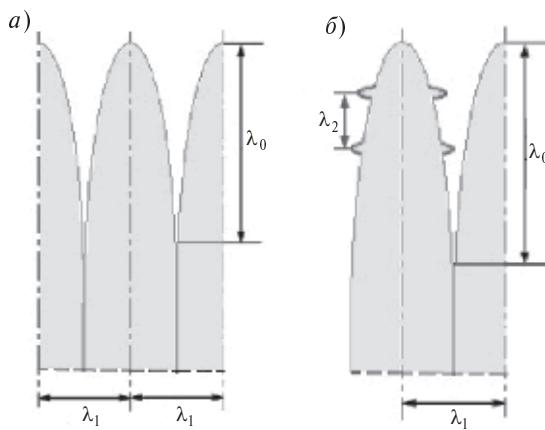


Рис. 1. Схема формирования ячеистой (а) и дендритной (б) морфологии

$$= \sqrt{2\xi} \left[\frac{\phi^2 - 1}{2\xi} + \left(\frac{2\pi}{\xi} \right)^2 \right], \quad (5)$$

в котором $\xi = \lambda_2/R$; R — радиус кривизны вершины ствола; Γ — коэффициент Гиббса — Томсона; суммирование учитывает различие ряда параметров i -х компонентов сплава; ϕ — волновое число ($\phi = 4$ для решетки с кубической симметрией).

Условием морфологического перехода от ячеистой к дендритной структуре фронта кристаллизации согласно [7] является выполнение со-

отношения $\lambda_2 \leq \lambda_0$, где λ_0 — расстояние от вершины до точки смыкания соседних первичных стволов ячеистой структуры, отстоящих друг от друга на расстояние λ_1 . Для оценки λ_1 используется выражение [2], которое для многокомпонентных сплавов обобщается в виде

$$\lambda_1^2 = \frac{3R}{G} \left[\sum \frac{p_i(C_0)_i(1-k_i)}{k_i} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Конфигурация вершины растущего дендрита аппроксимирована параболоидом вращения, для которого $\lambda_1/2 = \sqrt{2R\lambda_0}$ [7], откуда следует

$$(\lambda_0)_{kp} = \frac{\lambda_1^2}{8R} = \frac{3}{8} G \left[\sum \frac{p_i(C_0)_i(1-k_i)}{k_i} \right]^{-1}. \quad (7)$$

При вычислении значений R и V в зависимости от заданного термического переохлаждения ΔT_t использованы соотношения [8]

$$R = \frac{\Gamma^*}{\sigma} \left[\frac{L}{c} P_t - \sum \frac{2p_i(C_0)_i(P_C)_i(1-k_i)}{1-(1-k_i)\text{Iv}(P_C)_i} \right]^{-1};$$

$$V = \frac{2a_L P_t}{R}, \quad (8)$$

где λ^* — параметр стабильности ($\lambda^* \approx 0,025$); L , c , a_L — теплота кристаллизации, теплоемкость и температуропроводность расплава; $\text{Iv}(P) =$

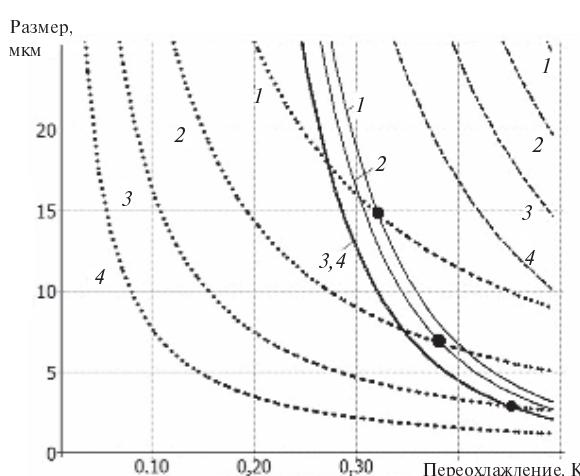


Рис. 2. Влияние термического переохлаждения на величину λ_0 (сплошные линии) и межосных промежутков λ_1 (пунктиры) и λ_2 (точки) для сплавов Fe-C-Si-Mn (C, % — 0,05 (1); 0,1 (2); 0,2 (3); 0,4 (4); Si, % — 0,1 (1–3); 0,2 (4); Mn, % — 0,1 (1–3), 0,2 (4))

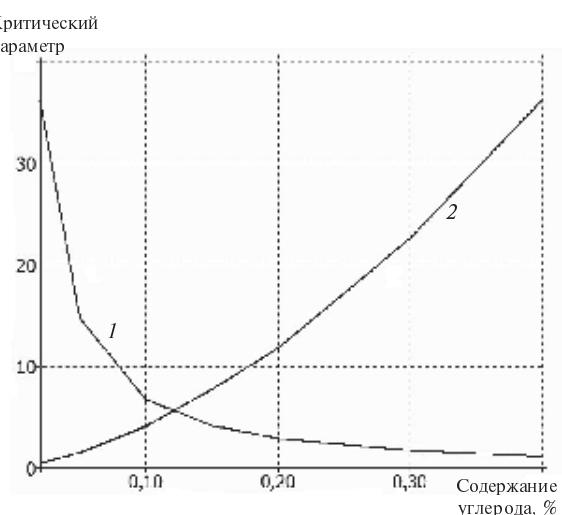


Рис. 3. Влияние содержания в исследованных сплавах на величину критических параметров λ_{kp} , мкм (1) и V_{kp} , 10 мкм/с, (2), отвечающих переходу от ячеистого фронта к дендритному

$= P \exp(P) Ei(P)$ — функция Иванцова от числа Пекле P ; P_t, P_c — термическое и диффузионное число Пекле ($P_t = VR/2a_L$; $P_c = VR/2D_L$);

$$P_T = Iv^{-1} \left(\frac{c}{L} \Delta T_t \right).$$

Повышение переохлаждения приводит в результате возрастания скорости роста V к интенсификации накопления в расплаве избыточных компонентов, связанного с их перераспределением между фазами (при $k_i < 1$) и с неполнотой диффузии в расплаве (D_L), что вызывает уменьшение λ_0, λ_1 и λ_2 (рис. 2). Пересечение кривых λ_0 и λ_2 отмечает переход от дендритной (при меньшем переохлаждении) к ячеистой морфологии роста.

В сплавах Fe—C—Si—Mn увеличение содержания углерода (0,02—0,4 %), Si и Mn (0,1—0, %)

способствует более интенсивному формированию приграничного слоя, обогащенного компонентами сплава ($k_i < 1$ — см. табл. 1), вследствие чего сокращаются значения междуосных промежутков λ_1 и λ_2 (рис. 2) и морфологический переход (ячейки \leftrightarrow дендриты) происходит при меньших междуосных расстояниях λ_{kp} и более высокой скорости кристаллизации V_{kp} (рис. 3).

Результаты численного расчета позволяют оценить количественные условия превращений «плоский фронт \rightarrow ячеистая кристаллизация» и «ячеистая кристаллизация \rightarrow дендритная кристаллизация» и исследовать влияние различных факторов на условия структурных переходов, результаты которых важны для качества литого металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флемингс, М. Процессы затвердевания [Текст] / М. Флемингс.— М.: Мир, 1977.— 424 с.
2. Kurz, W. Fundamentals of solidification [Текст] / W. Kurz, D.J. Fisher.— Trans. Tech. Publ., 1998.— 305 р.
3. Элиот, Р. Управление эвтектическим затвердеванием [Текст] / Р. Элиот.— М.: Металлургия, 1987.— 352 с.
4. Galenko, P.K. Physics of dendrite [Текст] / P.K. Galenko, V.A. Zhuravlev.— World Scientific, 1994.— 199 р.
5. Голод, В.М. Теория, компьютерный анализ и технология стального литья [Текст] / В.М. Голод, В.А. Денисов.— СПб., ИПЦ СПГУТД, 2007.— 610 с.
6. Баландин, Г.Ф. Теория формирования отливки. Основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки [Текст] / Г.Ф. Баландин.— М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998.— 360 с.
7. Yoshioka, H. Crystal growth and its morphology in the mushy zone [Текст] / H. Yoshioka, Y. Tada, Y. Hayashi // Acta Mater.— 2004. Vol. 52, № 6.— P. 1515—1523.
8. Голод, В.М. Моделирование и компьютерный анализ кристаллизации многокомпонентных сплавов на основе железа [Текст] / В.М. Голод, К.Д. Савельев, А.С. Басин.— СПб., Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 372 с.

УДК 669.01:622.7:662.2

И.О. Попов, А.М. Пупышев

ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЙ МЕТОД СЕЛЕКТИВНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ ЖЕЛЕЗО-ТИТАНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Сочетание уникальных свойств титана и его диоксида оказывает значительное влияние на стремительное расширение области его применения, на создание новых материалов и развитие на их основе современной техники.

Россия входит в тройку крупнейших мировых производителей титановой губки и металлического титана, выпуская около 20 % производи-

мого в мире губчатого титана (табл. 1). При этом для производства используется в основном импортное сырье, которое закупается главным образом в Украине, а также в Шри-Ланке, Австралии, Сьерра-Леоне и других странах [1].

Объемы производства диоксида титана в России по сравнению с другими развитыми странами находятся на низком уровне — в мире

Таблица 1

Динамика производства губчатого титана, тыс. т

Страны	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.
Россия	14,8	14,8	15,4	20,1	29	30
Украина	6,2	6,1	6,9	7	8,4	10
Казахстан	18	18	15	15	19	23
Китай	2,5	3,6	4	4,8	9,2	13,3
Япония	24,9	25,2	18,9	23,1	30,8	37,8
США	15,1	9,4	12,2	11,4	12,7	14,2
Всего	81,5	77,1	72,4	81,4	109,1	128,3

для его получения используется 97 % титанового сырья. На Соликамском магниевом заводе в 2007 году выпущено 3700 тонн диоксида титана, что составляет 0,07 % мирового производства [2]. В настоящее время диоксид титана производится на 53 заводах в 26 странах мира. Структура производства диоксида титана крупнейшими фирмами-производителями, составленная на основе данных компании IBMA, представлена на рис.1.

В определенной мере отсутствие в России масштабного производства титана и его диоксида из собственных руд объясняется тем, что с распадом СССР разрабатываемые в то время месторождения титановых руд, на базе которых было реализовано производство титана и пигментного диоксида титана, остались на Украине и Казахстане.

Согласно докладам Минприроды России «Состояние и использование минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации» по объему прогнозных ресурсов титана Россия занимает

второе место в мире после Китая. Ресурсы превышают 700 млн тонн по диоксиду титана [3].

В связи с изложенным значительный интерес представляет освоение отечественных месторождений. Одним из направлений является использование титаносодержащих руд Кольского полуострова России, где сосредоточены огромные запасы титанового сырья в комплексных рудах. Например, месторождения Себельярв, Гремяха — Вырмес, Колвицкое, Цагинское, Лесная Варака, Хибинское (апатито-нефелиновые руды), Африканское (перовскитовые руды) и других. Особый интерес представляют месторождения Гремяха — Вырмес (крупнейшее на евроазиатском континенте) и Хибинское (титаномагнетитов), а также сфен — техногенные отходы ОАО «Апатит». Последние особенно цепны тем, что не требуют заметных инвестиций в добычу сырья — титаномагнетитовых концентратов.

Месторождение Гремяха — Вырмес в соответствии с мировой классификацией относится к крупным. При обогащении руд месторожде-

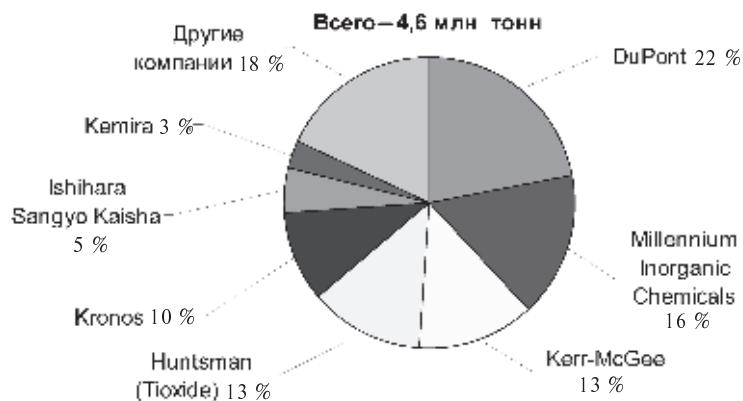


Рис. 1. Структура производства диоксида титана крупнейшими компаниями мира



ния могут быть получены кондиционные ильменитовый (46–47 % TiO_2) и титаномагнетитовый концентраты (8–9 % TiO_2).

Крупное Хибинское месторождение апатит-нефелиновых руд интенсивно разрабатывается более 60 лет. Руды включают ценное титановое сырье — высокотитанистый титаномагнетит (14,5–16,5 % TiO_2), а также сфен (35 % TiO_2). Оба минерала являются техногенными отходами на ОАО «Апатит» и накапливаются в хвостохранилищах более 60 лет. Из руды на опытной установке выделяется некоторое количество титаномагнетитового и сфенового концентратов [4].

Для вовлечения в эксплуатацию отечественных месторождений российской промышленности требуется новая эффективная технология их переработки.

Анализ известных способов получения диоксида титана из титаносодержащих рудных концентратов показал следующее. Основными сырьевыми источниками технологий получения диоксида титана служат ильменитовый (ИК) и природный рутиловый концентраты (РК) (рис. 2), при этом большая часть диоксида титана производится из ИК. В промышленности используются в основном три способа их переработки. Первый — получение TiO_2 непосредственно из ИК сульфатным (гидрометаллургическим) или хлоридным способами. Второй — предварительное получение из ИК титановых шлаков, а затем извлечение из них TiO_2 по сульфатной или хлоридной технологии. Третий — предварительное получение из ИК искусственных (синтетических) рутиловых концентратов и их последующая переработка по сульфатной или хлоридной схеме.

Известные технологии получения диоксида титана непосредственно из ИК материально- и энергоемки, характеризуются сравнительно невысоким извлечением титана в товарную продукцию и относительно большими отходами, загрязняющими окружающую среду.

Более распространенный способ переработки ИК — углеродическое их восстановление и получение в рудотермической печи расплавов высокотитанистых шлаков и науглероженного металлического железа (чугун) [5]. При этом более эффективна и экономична двухстадийная технология восстановления, включающая на первой стадии предварительное восстановление углеродом кокса, окомкованного ИК во вращающейся трубчатой печи, а на второй — довосста-



Рис. 2. Сырьевые источники производства диоксида титана

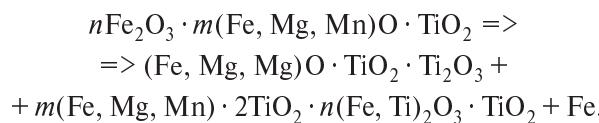
новление полученного огарка с углеродом кокса и получение расплавов титанового шлака и чугуна [6]. Известный способ восстановления с использованием двухстадийной схемы сравнительно энергоемкий и дорогостоящий процесс. Он характеризуется высокими затратами электрической энергии (1800–1900 кВт·ч/т шлака), оgneупоров, графитированных электродов, восстановителя, значительной общей продолжительностью процесса восстановления, низким тепловым КПД, а также неполным восстановлением оксидов железа из титановых шлаков. Получаемые в результате электроплавки высокотитанистые шлаки необходимо измельчать, отделять металлическую фазу чугуна, а чугун переплавлять. Известные способы переработки титановых шлаков по сульфатной и хлоридной технологиях хотя и экономичнее, чем аналогичные технологии переработки непосредственно ИК, но им также присущи недостатки, а именно: неполное извлечение диоксида титана, высокая материало- и энергоемкость и др.

В мировой практике расширяется проведение работ по термохимической обработке титановых (ильменитовых) концентратов с целью производства искусственных рутиловых концентратов и отделения железа без электроплавки. Технологический процесс получения искусственного рутила с содержанием в конечном продукте TiO_2 70–95 % состоит из следующих основных операций: восстановительного обжига ИК; селективного разделения огарка методами физического обогащения на металлизированную (железистую) и оксидную (титанистую) части; доработку титанистой части (выщелачивание) с получением искусственного рутилового концентрата [4, 7–9].

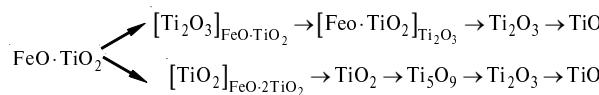
Третий способ переработки характеризуется большей эффективностью, но и определенными недостатками: сравнительно неполным селективным разделением железа и титана на стадии углеродистого восстановления концентратов; необходимостью в схемах дополнительного концентрирования данных металлов выщелачиванием, что влечет за собой использование дополнительных реагентов и необходимости регенерации этих реагентов из побочных продуктов выщелачивания.

В работах Института metallurgии имени А.А. Байкова установлено, что ильменитовые концентраты имеют сравнительно низкую температуру плавления (1365°C) и обладают более трудной восстановимостью по сравнению со свободными окислами железа в области температур до 1100°C . При более высоких температурах, особенно выше 1250°C , восстановление закиси железа до железа и двуокиси титана до низших окислов становятся равновероятными процессами.

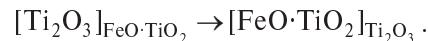
Авторы [10] установили, что по мере повышения температуры одновременно восстанавливаются железо и титан. При 1200–1250°C в восстановленном продукте ильменит не обнаруживается, но увеличивается количество тагировита, аносовита и металлического железа. На основании этих опытов авторы дают следующую схему восстановления ильменита при температурах выше 1150°C:



Исследования В.А. Резнеченко [9] по восстановлению ильменитового концентрата твердым углеродом показали, что вследствие подобия решеток или одинакового их типа наблюдается следующая последовательность появления промежуточных соединений титана:



Так, благодаря влиянию структурного фактора, низшие окислы титана могут образовываться на начальной стадии восстановления ильменита и существуют наряду с окислами железа при высоких температурах в присутствии восстановителя, например в твердом растворе титанита:



При температурах выше 1100 °С на твердой стадии процесса восстановление ильменита проходит с образованием твердого раствора двуокиси титана в дититанате железа (аносовита), растворяющего до 10 молей двуокиси титана и содержащего при этом 6,97 % FeO. С появлением Ti_2O_3 уже на твердой стадии процесса (>1100 °С) происходит растворение ильменита в полутораокиси титана и образование твердых растворов [12–14]. Восстановление закиси железа из них весьма затруднительно, вызывает дополнительный расход восстановителя и увеличение длительности плавки, что в свою очередь приводит к повышенному расходу электроэнергии и снижению производительности электропечей. Развитию процесса восстановления твердых растворов способствует ранее плавление шихтовых материалов и перевод процесса восстановления в жидкую фазу, что не интенсифицирует, а удлиняет плавку.

Поэтому для селективного восстановления железо-титановых концентратов необходимо ограничить восстановление двуокиси титана до Ti_2O_3 и максимально развить процессы восстановления закиси железа ниже температур 1100 °C, когда степень восстановления двуокиси титана незначительна.

Использование в качестве восстановителя водорода могло бы исправить положение, так как он обладает большей проникающей способностью, его сродство с кислородом позволяет вести процесс при низких температурах, а образующийся материал при этом имеет более развитую поверхность без оплавления частиц с высокой степенью металлизации железа. Так, в одном из способов восстановление ильменитового концентрата в печи «кипящего слоя» ведут при температуре ~ 900 °C газообразным восстановителем H_2 [15]. Основные недостатки способа — большие затраты на создание крупнотоннажной установки для получения водорода, относительно высокая стоимость производства водорода, значительный избыточный расход водорода для восстановления и уменьшения содержания водяных паров в реакционном газе, большой вынос пыли из печей кипящего слоя и их рецикл, значительные объемы газоочистки и потери ильменитового концентрата при переработке пыли, что делает восстановление железо-титановых концентратов водородом малорентабельным.



В металургической практике твердофазного восстановления природных титанатов железа (являющихся вещественной основой ильменитовых и титаномагнетитовых концентратов — ТМК) широко известно использование в качестве восстановителей углерода С (кокс) и его оксида CO, а также таких газов, как H₂ и H₂ + CO. Менее изучены процессы восстановления титанатов железа природным газом, жидкими углеводородами и смесями из приведенных выше восстановителей. Во всех случаях целью процесса служит селективное восстановление оксидов железа титанатов.

Основные методы промышленного восстановления оксидов железа природных титанатов включают известные схемы реакций и использование для этой цели твердого углеродистого восстановителя (кокс) и газов CO и H₂. Рассмотрим три схемы физико-химических взаимодействий, поясняющие сущность известных методов восстановления оксидов железа титанатов при использовании углерода и простых газообразных восстановителей CO и H₂: для процесса восстановления титанатов углеродом и его окисью (схема А), а также водородом (схема Б) и смесью восстановителей С, CO и H₂ (схема В). Обозначим как MeO сложные оксиды двух- и трехвалентного железа титанатов, а для сравнения схем восстановления А, Б и В приведем результирующие реакции получения в титанатах металлической фазы железа — Me.

Исходя из известного адсорбционно-автокаталитического механизма твердофазного восстановления оксидов металлов газообразными восстановителями (разработан Г.И. Чуфаровым) схемы реакций А, Б и В селективного восстановления сложных оксидов железа (MeO) титанатов с получением металлической фазы железа (Me) в них имеют следующий вид:

Схема А

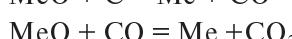
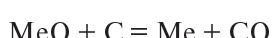
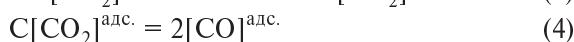
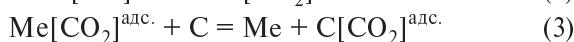
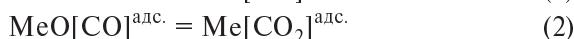
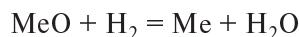
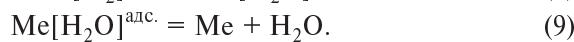
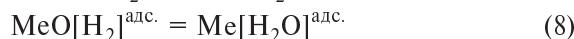
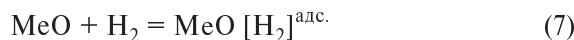


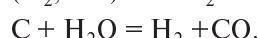
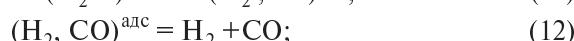
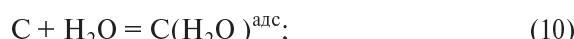
Схема Б



В схеме В механизм и результирующие реакции восстановления MeO смесью восстановителей С, CO и H₂ описываются параллельными превращениями (1)–(9).

Соответственно имеет место параллельное восстановление MeO до Me разными восстановителями. Одновременно также происходит адсорбция CO и H₂ на поверхности MeO, а также десорбции газообразных продуктов реакции CO₂ и H₂O с поверхности восстановленного Me. В то же время, как известно, процессы (1)–(9) взаимозависимы, на массовые скорости отдельных процессов и активности компонентов отдельных реакций оказывают влияние все участвующие в параллельных реакциях вещества, включая восстановители и продукты реакций.

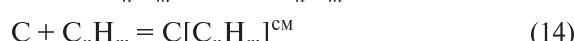
Рассматриваемую схему характеризует также параллельный процесс регенерации водорода по реакциям (10)–(12), происходящий на поверхности углерода кокса при адсорбции на нее водяного газа:



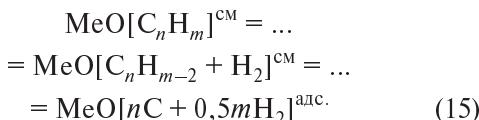
Предлагаемый газогенераторный метод промышленного восстановления природных титанатов железа включает следующую схему восстановления:

1. Предварительный нагрев титанатов (ИК или ТМК) в смеси с коксом до температуры красного каления — 500–700 °C.

2. Смачивание вначале процесса восстановления поверхности титанатов и кокса жидким углеводородным топливом:

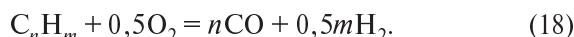
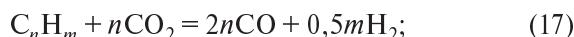
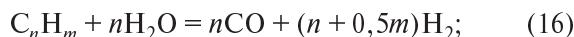


3. Пиролиз жидких углеводородов на границе раздела пленка — частица в результате нагрева с образованием активных восстановителей (водород, монооксид углерода и сажистый углерод)



4. Восстановление MeO до Me смесью восстановителей C, CO и H₂, протекающее по механизму, аналогичному B (реакции (1)–(9)), и с характерной ему регенерацией H₂ по реакциям (10)–(12).

5. Параллельно пиролизу жидких углеводородов на границе пленка — газовая фаза идет процесс газификации углеводородов в соответствии с реакциями



Принципиальные отличия предлагаемого газогенераторного метода:

он идет непосредственно на поверхности частицы MeO;

отсутствие стадии адсорбции восстановителей на поверхности MeO (лимитирующий процесс на начальной стадии восстановления), благодаря смачиванию частиц титанатов жидкими углеводородами;

повышенная концентрация восстановителей вблизи с оксидами;

закрытая от окислительной атмосферы система.

Все это позволяет уменьшить инкубационный период образования новой фазы — Fe — и интенсифицировать процесс восстановления, обеспечить глубокое селективное восстановление железа титанатов, ограничить восстановление оксидов титана (процесс восстановления проходит при температурах меньше 1100 °C), избегая растворения ильменита в полутораокиси титана и образования твердых растворов, негативно влияющих на процесс.

Проведена большая серия исследований газогенераторного метода селективного восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов: ИК месторождения Гремяха — Вырмес, ТМК Хибинского месторождения и Оленигорского железорудного концентрата, содержащих разное количество TiO₂ и оксидов Fe⁺², Fe⁺³ (табл. 1).

В процессе исследований определялась начальная температура восстановления; время, необходимое для полного протекания процесса; динамическим методом — по количеству образовавшихся в единицу времени реакционных газов — определялись массовая скорость восстановления, степень металлизации восстанавливаемого материала; влияние добавки жидкого углеводородного топлива на ход процесса восстановления, химический состав и структуру конечного продукта.

При создании в печи нового газогенераторного метода получены следующие результаты: процесс восстановления сложных титаносодержащих концентратов по сравнению с углеродным протекает при более низких температурах (<1100 °C), тем самым ограничивая восстановление двуокиси титана и обеспечивая при этом высокую степень восстановления оксидов железа (85–95 %) без спекания и оплавления частиц.

Созданный метод газогенераторного восстановления включает оригинальную — в одной печи — низкозатратную и безопасную технологию получения газогенераторного газа H₂ + CO и его использования для восстановления, которая реализуется с помощью базовой цепи разработанных аппаратов (рис. 3).

В одном аппарате — газогенераторной восстановительной печи — совмещены газогенераторная установка и восстановительная печь; по сравнению с известными раздельными процессами и углеродными технологиями сущес-

Таблица 2

Содержание основных компонентов в исходных концентратах, масс. %

Компонент	Титаномагнетитовый концентрат	Ильменитовый концентрат	Железорудный концентрат
TiO ₂	15,5	46,75	—
Fe ₂ O ₃	34,5	4,22	63,40
FeO	40,5	40,9	26,70

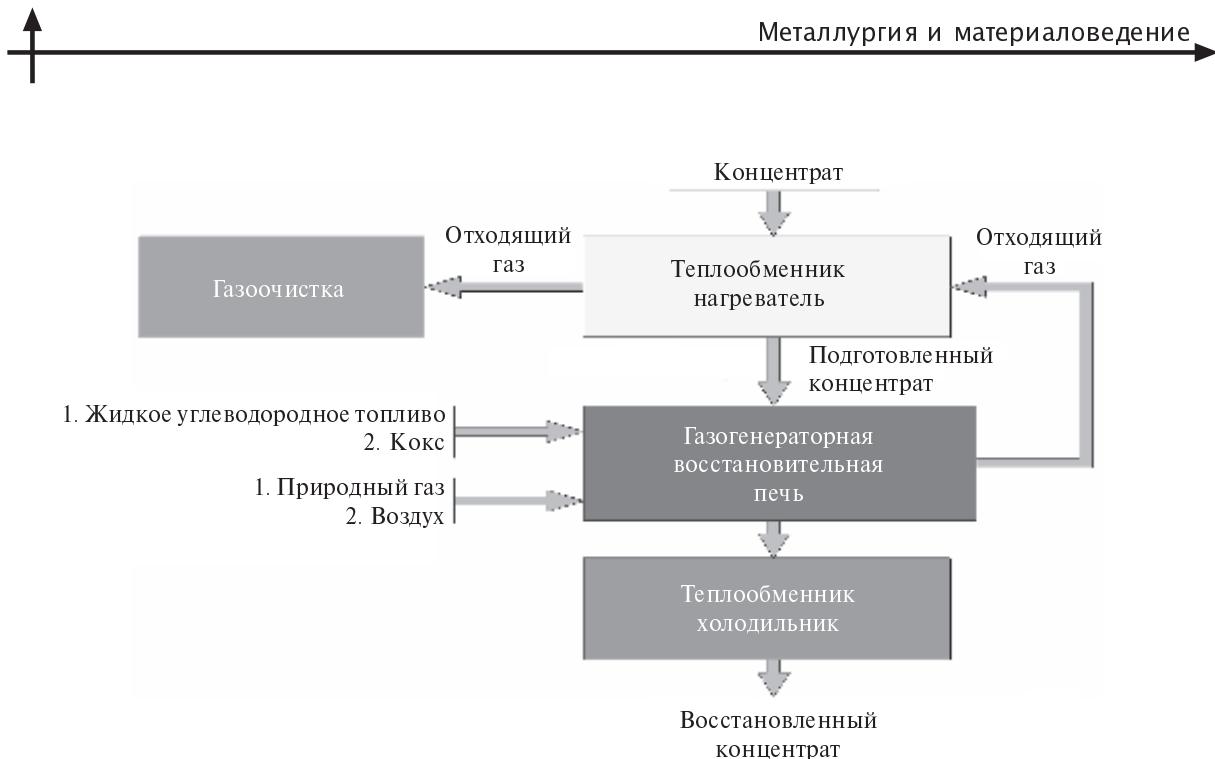


Рис. 3. Блок-схема газогенераторной технологии восстановления

ственно снижены удельные затраты на восстановление и оборудование; уменьшены также общие объемы оборудования и здания для его установки.

Начальная металлургическая обработка и нагрев концентрата осуществляются с использованием тепла отходящих из печи газов в теплообменнике — нагревателе, который служит также пылеуловителем и камерой дожигания CO и H₂.

Охлаждение горячего огарка происходит в теплообменнике — охладителе с получением пара и горячей воды.

Преимущества новой газогенераторной технологии восстановления:

высокая удельная производительность газогенераторной восстановительной печи, которая является результатом совмещения процессов получения газа H₂ + CO и восстановления концентратов, а также использования катализатора и предварительного нагрева концентратов. Катализатором параллельных реакций конверсии углеводородного топлива и восстановления железа служат образующиеся в печи активные фазы железа и углерода;

высокий тепловой КПД установки, являющийся следствием сравнительно низких температур восстановления в печи и использования тепла отходящих газов и огарка;

низкие удельные затраты на производство по сравнению с углеродными технологиями восстановления концентратов, обусловленные более низкими удельными затратами топлива и восстановителей и высоким тепловым КПД установки;

новые продукты технологии — специальные порошки рудных концентратов — с высокой степенью металлизации и активностью железа, а также с оптимальной структурой фаз (их обособленность и состав) для создания современных высокоэффективных комплексных схем их переработки;

экологические параметры технологии — эффективная, тонкая очистка газов от пылей и сокращенные удельные объемы CO₂ в отходящих газах из-за применения H₂ в качестве восстановителя.

На разработанный метод восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов получен патент РФ № 2379356 [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рынок редких металлов 2010: ТИТАН (титановые руды, диоксид титана, титан) [Текст] // METALResearch. — 2010.
2. Сырьевой комплекс России: Титан.— [Интернет ресурс] // Информационно-аналитический центр «Минерал».— <http://www.mineral.ru>.

3. Перспективы титана России: проблемы Украины [Интернет ресурс] // <http://www.ugmk.info.ru>.
4. **Александров, А.А.** Направление рационального использования хибинского титаномагнетита [Текст] / А.А. Александров, И.О. Попов, В.С. Селин [и др.] // Сб. тр. 2-й Международной научно-практической конф. «Темпы и пропорции социально-экономических процессов в регионах Севера» / Кольский научный центр РАН.— Апатиты, 2003.— С. 124–129.
5. **Гармата, В.А.** Металлургия титана [Текст] / В.А. Гармата, Б.С. Гуляницкий [и др.]— М.: Металлургия, 1968.— С. 101–116.
6. **Зеликман, А.Н.** Металлургия редких металлов [Текст] / А.Н. Зеликман, О.Е. Крейн [и др.]— М.: Металлургия, 1978.— С. 234.
7. **Гармата, В.Л.** Титан [Текст] / В.Л. Гармата, А.Н. Петрунько [и др.]— М.: Металлургия, 1983.— 559 с.
8. **Попов, И.О.** Технология доводки и гидрометаллургической переработки хибинского высокотитанистого титаномагнетита [Текст] / И.О. Попов, А.М. Макаров, А.И. Ракаев [и др.] // Обогащение руд.— 2004. № 1.— С. 23–27.
9. **Пат. 2379356 РФ: МПК C21B13/08.** Способ восстановления ильменитового концентрата [Текст] / Попов И.О., Пузышев А.М., Самойленко Л.С.; заявители и патентообладатели Попов И.О., Пузышев А.М., Самойленко Л.С.— № 2008107158/02; заявл. 26.02.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2.
10. Титан и его сплавы [Текст] // М.: Изд-во АН СССР, 1963.— Вып. IX. С. 96.
11. **Резниченко, В.А.** Электротермия титановых руд [Текст] / В.А. Резниченко.— М.: Наука, 1969.
12. **Бардин, И.П.** Металлургия СССР [Текст] / И.П. Бардин, В.А. Резнченко.— М.: Металлургиздат, 1958.— С. 583–623.
13. **Руднева, А.В.** [и др.] / ДАН СССР.— 1959. № 1.— С. 115.
14. **Руднева А.В.** / ДАН СССР.— 1959. № 1.— С. 125.
15. **Зеликман, А.Н.** Металлургия редких металлов [Текст] / А.Н. Зеликман, Г.А. Meerzon.— М.: Металлургия, 1973.— С. 268–269.

УДК 338.33:669.01

Н.И. Новиков, С.П. Казаков

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ДИВЕРСИФИКАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Стратегия диверсификации как способ увеличения конкурентоспособности, снижения рисков предприятия и, соответственно, роста рыночной стоимости бизнеса — предмет изучения широкого спектра научных дисциплин. В публикуемых результатах исследования диверсификации преимущественно рассматриваются ее качественные характеристики, в то время как методы количественной оценки направлений диверсификации остаются вне поля зрения исследователей. В итоге общепринятая методика количественной оценки направлений диверсификации отсутствует.

Цель данной статьи — анализ существующих способов количественной оценки направлений диверсификации, их практического применения, а также попытка разработки и обоснования методики количественной оценки горизонтальной диверсификации.

Для оценки направлений диверсификации, по мнению авторов, необходимо использовать абсолютное число производимых и реализуемых наименований продукции. Целесообразность использования этого показателя для оценки направлений диверсификации отмечали Ф. Шерер и Д. Росс в своей работе «Структура отраслевых рынков» [1], где направления диверсификации как продуктые линии (ПЛ) авторы определяли в соответствии со стандартными отраслевыми кодами Федеральной комиссии по торговле (ФКТ) США. Суммарное число продуктовых линий (ЧПЛ) по кодификации ФКТ в период проведения исследования (его окончание пришлось на 1975 год) составляло 261, в то время как среднее ЧПЛ, в которых осуществляло свою деятельность 200 анализируемых предприятий, насчитывало лишь 10,89 наименований. Лишь



пять наиболее диверсифицированных компаний в среднем имели по 53 продуктые линии каждая.

Недостаток рассмотренного подхода к оценке направлений диверсификации — в невозможности его использования для сравнительного анализа направлений диверсификации предприятий из разных государств, так как в каждой стране применяются локальные отраслевые классификаторы, содержащие различное ЧПЛ. Соответственно и абсолютное ЧПЛ компаний разных стран несопоставимо.

Следует подчеркнуть, что в мировой экономической практике применяется такой классификатор, как Международная стандартная промышленная классификация (ISIC), которую можно использовать в разных государствах для подсчета ЧПЛ. ISIC — иерархическая классификация видов экономической деятельности, составленная ООН и рекомендуемая для использования в мировом экономическом сообществе. Третья версия этой системы одобрена и рекомендована для использования (1989 год) и действует в настоящее время. Этот подход к отраслевой классификации заключается в группировке отраслей по разным уровням агрегации с присвоением номера каждому уровню. Наименьшему уровню агрегации присваивается четырехзначный номер; на этом уровне предприятия имеют наименьшее количество отраслевых направлений и относятся к узкоспециализированным фирмам с низким уровнем диверсификации (УД). Поднимаясь выше по иерархии агрегации, предприятие расширяет свою деятельность на большее количество отраслей, увеличивая и свой уровень диверсификации. В отечественной экономике в качестве аналога ISIC может рассматриваться Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД).

Введенный в действие в 2007 году ОКВЭД в соответствии с международной практикой не делает различий между внутренней и внешней торговлей, что дает возможность определять уровень диверсификации предприятий, осуществляющих свою деятельность как на внутреннем, так и на внешнем рынках.

Код группировок видов экономической деятельности состоит из двух—шести цифровых знаков, и его структура может быть представлена в следующем виде:

XX. — класс;

XX.X — подкласс;

XX.XX — группа;

XX.XX.X — подгруппа;

XX.XX.XX — вид.

В качестве признаков классификации видов экономической деятельности в ОКВЭД используются признаки, характеризующие сферу деятельности, процесс (технологию) производства и т. д.

Авторы предлагают: используя ЧПЛ (число продуктовых линий) для количественной оценки видов экономической деятельности в ОКВЭД, рассчитывать уровень диверсификации в любом направлении производственно-хозяйственной деятельности предприятия по формуле

$$УД = 1 + \frac{ЧПЛ_n - ЧПЛ_o}{ЧПЛ_o}, \quad (1)$$

где ЧПЛ_n — число продуктовых линий, в которых осуществляет свою деятельность предприятие; ЧПЛ_o — число продуктовых линий, представленных в ОКВЭД.

При определении ЧПЛ_n предлагаем использовать формы бухгалтерской или статистической отчетности предприятия, в которых указываются коды видов экономической деятельности предприятия.

При количественной оценке уровня горизонтальной диверсификации (в рамках одной отрасли) подсчет ЧПЛ_o ограничится соответствующим разделом/подразделом классификатора, а для уровня комплексной диверсификации подсчет ЧПЛ_o должен быть произведен в рамках всего ОКВЭД.

Экономическая интерпретация предлагаемого показателя заключается в следующем:

$$0 < УД \leq 1,$$

т. е. уровень диверсификации предприятия будет стремиться к нулю в случае, если компания осуществляет свою деятельность в одной продуктовой линии. С увеличением ЧПЛ предприятия его уровень диверсификации растет, достигая максимума, равного единице.

Для примера, приведенного выше (при среднем значении ЧПЛ 10,89 из 261 возможных) для 200 компаний, уровень диверсификации составит 0,042, в то время как у пяти наиболее диверсифицированных фирм он будет равен 0,203.

Отличительная особенность и новизна предлагаемой авторами статьи количественной оценки уровня диверсификации предприятия на ос-

нове ЧПЛ — это возможность ее использования для сравнения уровней диверсификации предприятий, осуществляющих свою деятельность в различных государствах.

Вместе с тем рассмотренные способы определения уровня диверсификации с помощью кодов промышленной классификации не лишены недостатков. Прежде всего, они не учитывают степень распределения деятельности предприятия между сегментами на рынке и влияние доли той или иной продуктовой линии на экономические показатели фирмы.

В качестве альтернативного варианта количественной оценки измерения горизонтальной диверсификации в [1] предложен индекс количественного эквивалента (ИКЭ) — вариант индекса Херфиндаля — Хиршмана [1], рассчитанный как

$$\text{ИКЭ} = \frac{1}{\sum P_i^2}, \quad (2)$$

где P_i — доля производства предприятия в i -й отрасли по отношению к его совокупному производству в n отраслях.

Предлагаемый индекс принимает минимальное значение, равное единице, когда предприятие работает только в рамках одной продуктовой линии. Если все линии предприятия равны по объему производства, то индекс количественного эквивалента равен числу линий. Чем больше различия между объемами производства по продуктовым линиям, тем значения индекса ближе к единице.

Для измерения уровня диверсификации, предложенного Бери (Berri, C.H. Corporate Growth and diversification // Journal of law and Economics. 1971, Vol. 14, № 2. P. 371–383), индекс Херфиндаля — Хиршмана (H) определяется по формуле [2]

$$H = 1 - \sum P_i^2. \quad (3)$$

При расчете по предложенной формуле значение индекса, равное 0, говорит о том, что предприятие ведет свою деятельность только в одном рыночном сегменте, а в случае, когда индекс стремится к единице, предприятие ведет свою деятельность сразу в нескольких сегментах рынка и отраслях экономики.

Еще один показатель уровня диверсификации — индекс энтропии (E), предложенный Яке-

мином и Бери (Jacquemin A.P., Berri C.H. Entropy Measure of Diversification and Corporate Growth// The Journal of Industrial Economics. 1979. Vol. 27, № 4. June, P. 359–369) [2]:

$$E = \sum P_i \ln \left(\frac{1}{P_i} \right). \quad (4)$$

Показатель индекса энтропии может принимать значения от нуля до бесконечности, отражая степень диверсифицированности компании.

Формулы (2)–(4), рассмотренные выше, содержат такой показатель, как долю производства (продаж) предприятием в какой-либо продуктовой линии. В качестве определителя такой доли оптимальным (а порой и единственным) критерием является, по мнению авторов, выручка от реализации. Источником получения информации об объеме реализации и его структуре служат формы бухгалтерской и статистической отчетности, а также годовые отчеты (в том числе консолидированные) предприятия. Однако, следует отметить, в этой отчетности не находят отражения весовые характеристики влияния того или иного реализуемого предприятием сортамента на общую его выручку. Кроме того, сортамент выпускемой продукции не подразделяется по видам экономической деятельности по ОКВЭД.

Результаты производственно-экономической деятельности ряда ведущих металлургических фирм России, а также показатели их диверсификации представлены в таблице.

Раскрывая смысл данных, представленных в таблице, делаем следующие заключения:

1. По числу продуктовых линий явный лидер — ЕвразГрупп (более 30 против 20 у НЛМК, 15 у Северстали и ММК), но выручка этой компании сопоставима с выручкой Северстали. Следовательно, зависимость ЧПЛ и выручки нелинейна.

2. При практически равных количествах ЧПЛ у Северстали и ММК (от 14 до 16 ЧПЛ у Северстали и от 14 до 15 у ММК) их индексы количественного эквивалента (ИКЭ) различаются более чем в два раза (у Северстали — 7, у ММК — 3). Следовательно, величина выручки, получаемой от каждой продуктовой линии, у Северстали распределена более равномерно, чем у ММК.

**Показатели деятельности ряда ведущих металлургических фирм России
и показатели их диверсификации**

Показатель	Значения показателя на анализируемые периоды		
	2008 г.	2007 г.	2006 г.
Группа [3]			
Выручка всего, млн. долл. США	23 787,00	15 177,00	0,00
Операционная прибыль, млн. долл. США	нет данных	нет данных	нет данных
Рентабельность продаж, %	0,00	0,00	0,00
EBITDA, млн. долл. США	нет данных	нет данных	нет данных
Рентабельность (от EBITDA), %	0,00	0,00	0,00
Число производственных линий, штук (по видам)	36	35	35
Индекс диверсии $E = \Sigma P_i \ln(1/P_i)$	2,47	2,33	2,33
Индекс количественного диверситета ($ИКЭ = 1 / \sum P_i^2$)	9,13	7,70	7,70
Индекс Херфиндэля — Хиршмана $H = 1 / \sum P_i^2$	0,8905	0,8702	0,8702
Н. ИМК [4]			
Выручка всего, млн. долл. США	нет данных	7 719,26	6 045,20
Операционная прибыль, млн. долл. США	нет данных	нет данных	нет данных
Рентабельность продаж, %	нет данных	0,00	0,00
EBITDA, млн. долл. США	нет данных	нет данных	нет данных
Рентабельность (от EBITDA), %	нет данных	0,00	0,00
Число производственных линий, штук (по видам)	нет данных	20	19
Индекс диверсии $E = \Sigma P_i \ln(1/P_i)$	нет данных	2,27	2,22
Индекс количественного диверситета ($ИКЭ = 1 / \sum P_i^2$)	нет данных	7,76	7,24
Индекс Херфиндэля — Хиршмана $H = 1 / \sum P_i^2$	нет данных	0,8711	0,8618
Северсталь [5]			
Выручка всего, млн. долл. США	22 392,72	15 503,39	12 722,84
Операционная прибыль, млн. долл. США	4 226,14	2 807,30	2 311,20
Рентабельность продаж, %	18,87	18,11	18,17
EBITDA, млн. долл. США	нет данных	нет данных	нет данных
Рентабельность (от EBITDA), %	нет данных	нет данных	нет данных
Число производственных линий, штук по видам	16	15	14
Индекс диверсии $E = \Sigma P_i \ln(1/P_i)$	2,30	2,32	2,20
Индекс количественного диверситета ($ИКЭ = 1 / \sum P_i^2$)	7,32	7,54	6,84
Индекс Херфиндэля-Хиршмана $H = 1 / \sum P_i^2$	0,8635	0,8674	0,8539
ММК [6]			
Выручка всего, млн. долл. США	10 550,00	8 197,00	6 424,00
Операционная прибыль, млн. долл. США	1 174,00	1 453,00	1 765,00
Рентабельность продаж, %	11,13	17,73	27,48
EBITDA, млн. долл. США	2 204,00	2 407,00	2 005,00
Рентабельность (от EBITDA), %	20,89	29,36	31,21
Число производственных линий, штук по видам	15	15	14
Индекс диверсии $E = \Sigma P_i \ln(1/P_i)$	1,74	1,73	1,62
Индекс количественного диверситета ($ИКЭ = 1 / \sum P_i^2$)	3,04	3,02	2,76
Индекс Херфиндэля — Хиршмана $H = 1 / \sum P_i^2$	0,6707	0,6686	0,6375

Окончание табл.

Показатель	Значения показателя за соответствующий период		
	2008 г.	2007 г.	2006 г.
Металлоизвест [7]			
Выручка нетто, млн руб.	164 726,00	58 300,00	
Выручка нетто, млн. долл. США ¹	5 490,87	1 943,33	
Операционная прибыль, млн руб.	48 860,00	18 553,00	
Рентабельность продаж, %	29,66	31,82	
EBITDA, млн руб.			
Рентабельность (от EBITDA), %			
Число производственных линий, штук по видам	8	5	
Индекс оправдания, $E = \sum P_i \ln(1/P_i)$	1,47	1,24	
Индекс количественного оквивалента, $(ИКЭ = 1 / \sum P_i^2)$	3,06	2,74	
Индекс Херфиндэля — Хиршмана $H = 1 / \sum P_i^2$	0,6734	0,6347	
ОАО «ТМК» [8]			
Выручка нетто, млн. долл. США	4 178,60	3 402,30	
Операционная прибыль, млн. долл. США			
Рентабельность продаж, %			
EBITDA, млн. долл. США	931,50	800,20	
Рентабельность (от EBITDA), %	22,29	23,52	
Число производственных линий, штук (по видам)	3	3	
Индекс оправдания, $E = \sum P_i \ln(1/P_i)$	0,76	0,82	
Индекс количественного оквивалента, $(ИКЭ = 1 / \sum P_i^2)$	1,85	1,98	
Индекс Херфиндэля — Хиршмана $H = 1 / \sum P_i^2$	0,4608	0,4940	
ОАО «ЧПИЭ» [9]			
Выручка нетто, тыс. руб.	34 854 400,00	42 630 553,00	
Выручка нетто, млн. долл. США ¹	1 161,81	1 421,02	
Операционная прибыль, тыс. руб.			
Рентабельность продаж, %			
EBITDA, млн руб.	2 956 376,00	6 124 126,00	
Рентабельность (от EBITDA), %	8,48	14,37	
Число производственных линий, штук (по видам)	1	1	
Индекс оправдания $E = \sum P_i \ln(1/P_i)$	0,00	0,00	
Индекс количественного оквивалента ИКЭ = $1 / \sum P_i^2$	1,00	1,00	
Индекс Херфиндэля-Хиршмана $H = 1 / \sum P_i^2$	0,0000	0,0000	

¹ Выручка нетто в тыс. руб. пересчитана на млн. долл. США по курсу 30 руб./долл.



3. Число продуктовых линий у Трубной металлургической компании (ТМК) в 10 раз меньше, чем у ЕвразГрупп (соответственно 3 и 35), однако индекс Херфиндаля — Хиршмана у ТМК (0,46) меньше, чем у ЕвразГрупп (0,87) лишь в два раза. Следовательно, величина снижения (увеличения) ЧПЛ не равна величине снижения (увеличения) индекса Херфиндаля — Хиршмана.

4. Для ТМК при неизменном ЧПЛ индекс энтропии сократился на 7,3 % (0,76 в 2007 году и 0,82 в 2006 году), что обусловлено снижением равномерности распределения выручки по продуктовым линиям. Из этого следует, что при равном ЧПЛ у компаний в различные отчетные периоды показатели уровня диверсификации могут меняться.

5. Увеличение ЧПЛ, имеющее место в деятельности Металлоинвеста, (с 5 до 8) привело к увеличению показателей:

индекса Хефингдаля — Хиршмана — на 6,09 %;

ИКЭ — на 11,68 %;

индекса энтропии — на 18,55 %.

Из приведенных результатов следует, что наиболее чувствительным к изменению ЧПЛ оказался ИКЭ.

При постоянном числе продуктовых линий на ММК в период 2007–2008 годов за счет динамики весов продуктовых линий в структуре выручки показатели изменились так:

индекс Херфиндаля — Хиршмана вырос на 3,1 %;

ИКЭ увеличился на 0,7 %;

индекс энтропии вырос на 0,6 %.

Другими словами, наиболее чувствительным к динамике весов продуктовых линий в структуре выручки оказался индекс Херфиндаля — Хиршмана.

В этой связи на данном этапе исследования влияния факторов на величину и динамику изменения критериев оценки уровня диверсификации нельзя однозначно сказать какой из критериев наиболее значим. Поэтому для всесторонней оценки уровня диверсификации с учетом весового влияния продуктовых линий на конечный результат деятельности предприятия авторы предлагают выполнять расчет по всем формулам со второй по четвертую.

С учетом изложенного авторы считают, что обязательными элементами алгоритма количе-

ственной оценки уровня диверсификации предприятия должны быть следующие:

1. Постановка цели проведения количественной оценки уровня диверсификации; при этом целью может быть:

- сравнение предприятий между собой (внутри одной страны или в сравнении с предприятиями из других стран);

- сопоставление динамики уровня диверсификации одного предприятия;

- динамика уровня диверсификации при реализации инвестиционных проектов и т. д.

2. Сбор информации из различных форм отчетности и приведение собранной информации к сопоставимым условиям.

3. Расчет уровня диверсификации способами, рассмотренными в настоящей статье:

- определение ЧПЛ в соответствии с классификатором видов экономической деятельности;

- расчет уровня диверсификации с учетом числа продуктовых линий по формуле (1);

- нахождение индексов, характеризующих уровень диверсификации, с учетом весового влияния продуктовых линий на конечный результат деятельности предприятия по формулам (2)–(4).

4. Интерпретация результатов.

5. Определение оптимального состояния предприятия, включая набор экономических показателей деятельности и соответствующие этому состоянию критерии уровня диверсификации.

6. Разработка корректирующих воздействий, направленных на достижение оптимального состояния предприятия.

Таким образом, комплексное использование рассмотренных в данной статье способов количественной оценки уровня диверсификации позволяет как выполнить сравнительный анализ предприятий по уровням диверсификации, так и изучить динамику трансформации бизнеса. Однако в связи с отсутствием в России четких требований по предоставлению в органы государственной статистики информации в соответствии с ОКВЭД по каждому бизнес-сегменту в настоящее время невозможно с большой долей достоверности выполнить оценку уровня диверсификации и на ее основе разработать рекомендации по оптимизации деятельности как для отдельного предприятия, отдельных отраслей, так и всей экономики страны в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шерер, Ф. Структура отраслевых рынков [Текст] / Ф. Шерер, Д. Росс / Пер. с англ.— М.: ИНФРА-М, 1997.— 698 с.
2. Григорьева, С.А. Финансовые исследования стратегий диверсификации на развитых и растущих рынках капитала [Текст] / С.А. Григорьева // «Корпоративные Финансы». 2007. № 1. С. 111–142.
3. Годовые отчеты «Евраз Групп С.А.» [Электрон. ресурс] // Режим доступа: <http://www.evraz.com.ru>.— 17.07.2009.
4. Годовые отчеты ОАО «НЛМК» [Электрон. ресурс] // Режим доступа: <http://www.nlmk.ru>.— 22.09.2009.
5. Годовые отчеты ОАО «Северсталь» [Электрон. ресурс] // Режим доступа: <http://www.severstal.ru/openness/results/activities>.— 08.08.2009.
6. Годовые отчеты ОАО «ММК» [Электрон. ресурс] // Режим доступа: <http://www.mmk.ru/rus/index.wbp>.— 21.08.2009.
7. Годовые отчеты «Металлоинвест» [Электрон. ресурс] // Режим доступа: <http://www.metallinvest.ru> 04.09.2009г.
8. Годовые отчеты ОАО «Трубная Металлургическая Компания» [Электрон. ресурс] // Режим доступа: <http://www.tmkgroup.ru>.— 02.09.2009.
9. Годовые отчеты ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» [Электрон. ресурс] // Режим доступа: www.chtpz.ru.— 10.09.2009.



ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 620.97

П.А. Москвин

БИОТОПЛИВО ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Биотопливо — это топливо из возобновляемого сырья. Оно бывает твердое (например, дрова) и жидкое. С применением дров как биотоплива в мире нет технологических проблем: дрова жгут в котлах, которые есть практически повсеместно. Развиваются технологии сжигания угля, торфа, газа, да и атомная энергия при нормальном подходе экологична и дает «чистое» электричество и/или тепловую энергию. Проблема сейчас в нехватке энергии для автомобилей и транспорта [4].

На производство топлива из возобновляемого сырья обратили внимание сравнительно недавно ввиду ухудшения экологической ситуации в мире и исчерпаемости запасов углеводородов. Биотопливо считается реальной альтернативой нефтяному топливу. Разработки и исследования ведутся в различных направлениях, технологии и способы получения биотоплива совершенствуются. Сконцентрируем внимание на существующих видах и перспективных направлениях развития биотоплива.

Биоэтанол — это биотопливный заменитель бензина. Производится из зерновых культур (по большей части — из пшеницы в Англии, сахарной свеклы и маиса, соевых бобов и сахарного тростника в США и Южной Америке [9]).

Топливный этанол не содержит воды и производится укороченной дистилляцией (две ректификационные колонны, а не пять, как для спирта, применяемого в пищевой промышленности). Биоэтанол нейтрален с точки зрения выброса парниковых газов. Содержащийся в этаноле кислород способствует более полному сжиганию углеводородов топлива. Присутствие в бензине всего 10 % этанола позволяет уменьшить выхлопы аэрозольных частиц до 50 %,

а выбросы угарного газа — на 30 %. Кроме того, с помощью генной инженерии создаются новые клоны дрожжей, которые более стойки к пагубным последствиям алкоголя и способны вырабатывать на 50 % больше этанола во время 21-часового периода. Эта технология сможет существенно увеличить эффективность производства топливного этанола из кукурузы и растительных отходов.

Согласно оценкам экспертов, к 2030 году выпуск биотоплива в мире составит 150 млн т, при ежегодном приросте производства 7–9 %. При этом предпочтение будет иметь биоэтанол, так как себестоимость его производства снижается быстрее, чем биодизель.

Биодизель — биотопливный заменитель дизельного топлива. Получают его из масел зерновых культур (чаще всего из семян рапса в Англии и пальмового масла в Юго-Восточной Азии). Биодизельное топливо привлекло внимание исследователей сравнительно недавно, но быстро приобрело важное значение. Согласно стандарту США биодизельным топливом считаютсяmonoалколовые эфиры жирных кислот, получаемых из растительного или животного сырья. Важнейшее достоинство применения биодизельного топлива — замена продуктов нефтепереработки на природное возобновляемое сырье [9].

Наиболее распространенным топливом этого типа является так называемый рапсметиловый эфир, который в заметном количестве используется в Швеции, ФРГ, Франции и других странах. Его можно добавлять к дизельному топливу в концентрации до 30 % без дополнительной модификации двигателя. В западноевропейских странах принято решение об обязательной добавке 5 % рапсметилового эфира в дизельное

топливо, но в некоторых странах, например в Швеции, его используют как самостоятельное топливо. Стоимость топлива на основе рапсметилового эфира в настоящее время примерно в два раза выше, чем нефтяного дизельного топлива, но можно полагать, что объемы производства метилированных растительных масел будут увеличиваться, и это приведет к снижению их себестоимости до приемлемого уровня.

Широкие испытания рапсметилового эфира и его добавок к дизельному топливу в США и Европе показали, что при их использовании снижается эмиссия углеводородов и CO, а интенсивность образования оксидов азота остается без изменения.

Топливный потенциал масличных культур (на 1 т сырья) значительно выше, чем у других культур. Расчеты показывают, что энергетические затраты на производство рапсовых семян составляют 17700 МДж/га, на извлечение масла — 700 МДж/га, энергия же, полученная от масла, — 22200 МДж/га. Таким образом, энергетическая прибыль с каждого гектара составляет 3800 МДж (по энергетической ценности это соответствует 110 л дизельного топлива).

Исходя из литературных данных и проведенных исследований можно выделить следующие основные преимущества биологического дизельного топлива:

возобновляемость;

замкнутый круговорот углекислого газа;

использование соломы рапса в качестве топлива в фермерском хозяйстве;

отсутствие серы и токсичных веществ;

незначительный выброс загрязнителей (за исключением закиси азота);

рапсовое масло — самое распространенное растительное масло и наиболее устойчивое к влиянию низких температур (без добавок — минимум до минус 10°C);

рапс задерживает питательные вещества в почве, улучшает ее структуру, поддерживает плодородие, хорошо перерабатывает органические удобрения;

при производстве рапсового масла получают такие ценные побочные продукты, как глицерин и жмы;

рапс — отличный медонос (с 1 га посевов пчелы собирают до 90 кг меда);

рапсовое масло нетоксично, не загрязняет грунтовые воды и водоемы (при утечках полно-

стью разлагается в почве в течение трех недель), обеспечивает рекультивацию радиоактивно загражденных земель;

рапсовое масло — самое безопасное горючее (точка воспламенения 325°C);

использование биотоплива не снижает ресурс двигателя, но уменьшает эмиссию вредных веществ на 25–50 % и парниковый эффект (до минимума), освобождает (хотя бы частично) от нефтяной зависимости.

Главные недостатки этого вида топлива:

закоксовывание форсунок, отложения углерода в камере сгорания и смолистых веществ на фильтрах;

быстрый износ колец;

повышенное выделение закиси азота в сравнении с традиционным дизельным топливом (на 12 % больше, чем для дизелей с неразделенной камерой сгорания, и на 10 %, чем для дизелей с вихревой камерой);

биотопливо из рапсового масла более агрессивно, чем обычное дизельное топливо по отношению к резиновым деталям автомобиля или трактора и лакокрасочному покрытию кузова;

в силу того, что МЭРМ — кислородосодержащее соединение, низшая теплота сгорания эфиров несколько меньше, чем у дизельного топлива, и, как следствие, на 2,5 % меньше эффективный КПД.

Две рассмотренные выше формы — это так называемое «биотопливо первого поколения», так как они получены из сырого материала, который можно использовать в пищевом производстве [1].

Вторичное биотопливо. Одним из последних достижений современной альтернативной энергетики стало биотопливо второго поколения, которое получают различными методами, в том числе пиролизом биомассы. Технология получила название *biomass to liquids (BtL)*. BtL производят из древесины и отходов деревообработки (при этом промежуточный продукт — биогаз). Преимущество этого вида топлива перед биоэтанолом и биодизелем в том, что, в отличие от упомянутых продуктов, при производстве BtL древесина полностью перерабатывается. BtL может производиться из любого вида биомассы, к тому же, по заявлению производителей этого топлива, для перевода автомобилей на него не требуется модификация современных двигателей. Быстрый пиролиз позволяет превратить биомассу в жидкость, которую легче и дешевле



транспортировать, хранить и использовать. Согласно исследованиям концернов Daimler Chrysler и Volkswagen синтетическое биотопливо не требует специальной доработки существующих автомобильных двигателей и модернизации сетей заправочных станций. Оно практически не содержит углекислого газа, серы и ароматических углеводородов.

Многие машины используют в качестве топлива природный газ. Для него также существует альтернативное топливо из возобновляемого сырья. *Биогаз* — биотопливная замена природного газа. Его получают из органических отходов, включая отходы животноводческих хозяйств и мусор, полученный от муниципальных, коммерческих и индустриальных источников, прошедшие процесс анаэробного разложения. В Соединенном Королевстве биогаз производится из отходов животноводства, а также за счет выделяющегося на свалках газа.

Для получения биогаза можно использовать растительные и хозяйствственные отходы, навоз, сточные воды и другие подобные источники. В процессе ферментации жидкость в резервуаре стремится к разделению на три фракции. Верхняя — корка, образованная из крупных частиц, увлекаемых поднимающимися пузырьками газа, через некоторое время может стать достаточно твердой и будет мешать выделению биогаза. В средней части ферментатора скапливается жидкость, а нижняя фракция выпадает в осадок в виде грязи.

Производство биогаза позволяет сократить выбросы метана в атмосферу. Переработанный навоз применяется в качестве удобрения в сельском хозяйстве. Это позволяет снизить применение химических удобрений, сокращается нагрузка на грунтовые воды.

Метан оказывает влияние на парниковый эффект в 21 раз более сильное, чем CO₂, и находится в атмосфере 12 лет. Захват метана — лучший краткосрочный способ предотвращения глобального потепления [5].

Сведем в таблицу экономические показатели некоторых видов топлива. За 100 % примем показатели бензина из нефти.

Таблица демонстрирует, что метanol и в особенности этанол экономически эффективны.

С каждым годом наука разрабатывает все новые способы получения биотоплива.

Ученые из Эдинбургского университета Наппера решили поддержать национальную экономику, не в последнюю очередь зависящую от экспорта виски, и разработали технологию производства биотоплива, в качестве сырья для которого используется все то, что владельцы шотландских винокурен привыкли считать отходами.

Используя образцы твердых и жидких отходов с фабрики Glenkinchie, исследователи получили бутанол, который на 30 % эффективнее классического биотоплива на основе этилового спирта.

Сейчас группа изобретателей приступила к коммерциализации своей разработки. Власти Евросоюза одобряют данную инициативу [11].

Американские ученые создали новый вид биотоплива, не отличающийся от обычного бензина, с помощью бактерий, перерабатывающих углеводы из различных типов промышленных и сельскохозяйственных отходов. Стоимость такого «биобензина» может не превысить 50 долларов за баррель, сообщается в статье исследователей.

Группа разработчиков сумела с помощью методов генной инженерии «научить» безвредные

Расчетные экономические показатели альтернативного топлива

Вид биотоплива	Затраты на производство, %	Стоимость единицы прохода автомобиля, %
Бензин из нефти	100	100
Сжиженный природный газ	50–60	70–75
Сжиженные углеводородные газы	60–70	80–99
Этилэтанол	65	90–130
Метанол	110	120
Этанол	120	170
Синтетический бензин	160	120

бактерии *E.coli* вырабатывать несвойственный им тип химических соединений — так называемые насыщенные углеводороды, или алканы. Именно алканы служат ключевым компонентом бензина, а потому такое биотопливо может быть сразу после получения отправлено в существующие распределительные сети заправочных станций. До сих пор для массового использования биотоплива, в частности биодизельного, приходилось создавать специальные станции и трубопроводы для очистки и транспортировки, так как химический состав такого типа синтетического топлива отличается от природного [10].

В Бразилии разработан очередной вид биотоплива — *H-биодизель*, (смесь нефтепродуктов и растительных масел). Он может стать достойной альтернативой бензину и спиртовому топливу в условиях дефицита нефтепродуктов.

Заявленные характеристики *H-биодизеля* идентичны параметрам стандартного дизельного топлива, однако благодаря растительным добавкам его использование ведет к меньшему загрязнению атмосферы продуктами горения и выбросу меньшего количества серы. Как показали тесты, *H-биодизель* к тому же более экономичен и будет обходиться дешевле обычного дизельного топлива, а также уже существующего в Бразилии биодизельного топлива, производимого на основе добавок растительных масел в дизель.

Биотопливо из водорослей. По своим энергетическим характеристикам водоросли значительно превосходят другие источники. 200 тысяч гектаров прудов могут производить топливо, достаточное для годового потребления 5 % автомобилей США, 200 тысяч гектаров — это менее 0,1 % земель США, пригодных для выращивания водорослей.

Однако водоросли, содержащие большее количество масла, растут медленнее. Например, водоросли, содержащие 80 % нефти, вырастают за 10 дней, в то время как водоросли, содержащие 30 %, — 3 раза в день.

Производство водорослей привлекательно еще и тем, что в ходе биосинтеза поглощается углекислый газ из атмосферы.

Однако основная технологическая трудность заключается в том, что водоросли чувствительны к изменению температуры, которая для их нормального роста должна поддерживаться на определенном уровне (резкие суточные колебания недопустимы).

Также коммерческому применению водорослей в качестве топлива препятствует отсутствие на сегодняшний день эффективных инструментов для сбора водорослей в больших объемах. Немецкий автопроизводитель Daimler AG совместно с компаниями Archer Daniels Midland (ADM) и Bayer Crop Science начали цикл изучения тропического растения ятрофа в качестве потенциального источника биодизельного топлива. Об этом сообщает Reuters со ссылкой на информацию Daimler.

Биологическое дизельное топливо, полученное в результате переработки ядер орехов ятрофы, имеет свойства, аналогичные тем, которые имеет биотопливо, полученное из рапсового масла. Оно к тому же характеризуется позитивным балансом CO₂ и, таким образом, может способствовать защите климата.

Специалисты сельскохозяйственного университета нидерландского города Вахенинген открыли способ получения *автомобильного топлива из соломы*.

Ученые придумали технологию, согласно которой солома нагревается до высокой температуры, к ней добавляются специальные ферменты, благодаря чему образуются сахара. На следующем этапе при помощи бактерий сахара превращаются в этанол, который используется в качестве топлива для автомобилей.

Производство достаточно экономично — около трети объема соломы идет в отходы, которые при горении дают энергию, необходимую для получения сахаров из остальных двух третей. При этом образуются излишки энергии, их можно применять в других целях. По подсчетам ученых, при переработке 5 т соломы по вышеуказанной технологии полученного биотоплива хватит автомобилю на год езды [6].

Учеными японского университета Кобе и специалистами автоконцерна Toyota было разработано высокоэффективное биотопливо из рисовой соломы. Стоимость нового альтернативного вида топлива будет в три раза ниже, чем у аналогичного продукта, созданного концерном Toyota ранее. Коммерческое производство нового биотоплива планируется начать через пять лет.

Наращивание мощностей производства биотоплива, поиск и создание новых его видов — сложная, трудоемкая задача, решением которой занимаются большие группы ученых в разных странах. Замена нефтяного топлива топливом из



возобновляемого сырья — это перспективное и необходимое направление научной деятельности, особенно если учесть исчерпаемость запасов нефти и пагубное влияние на экологию. Возможно, уже в скором времени люди будут ездить на продуктах переработки рапса, водорослей, тростника, и это улучшит экологическую ситуацию, снимет проблему энергетического кризиса [7].

Применение биотоплива связано с некоторыми проблемами. Элементный и структурный состав компонентов новых видов топлива значительно отличаются от традиционного углеводородного состава нефтяных топлив, что обуславливает их различия в физических, химических и эксплуатационных свойствах. Применение в качестве биотоплива необработанных растительных масел может привести к сбоям в работе двигателя. Использование смесевого топлива (смесь растительного масла с нефтяным дизельным топливом) не решает проблему лако- и нагарообразования, закоксовывания форсунок, загрязнения минерального картерного масла. Применение в качестве биотоплива растительных масел и их смесей требует некоторых изменений в конструкции двигателя. Более перспективным биотопливом для дизельных двигателей считают продукт переработки растительных масел по реакции метанолиза — метиловые эфиры растительных масел (МЭРМ, или биодизельное топливо). Отмечается, что при работе двигателя на этом топливе в большинстве случаев не наблюдается повышенного нагаро- и лакообразования, но проблемы уменьшения отложений и повышения стабильности биотоплив при длительном хранении требуют решения. В качестве причины нарушения работы дизельных двигателей при использовании биотоплив указывают их высокую вязкость и меньшую теплотворную способность по сравнению с нефтяным топливом при практически одинаковых цетановых числах, температурах кипения и молекулярной массе. С последними утверждениями нельзя со-

гласиться. Установлено, что именно различие в молекулярной массе компонентов топлив приводит к разнице их вязкости и испаряемости, определяемой фракционным составом — температурами кипения компонентов топлива, а значит, и к различиям в работе двигателей [2].

Даже если биотопливо — качественное, большое количество его сортов делает калибровку двигателей под оптимальную производительность практически невозможной. В наши дни некоторые производители дают гарантию на использование своих двигателей с полностью биологическим топливом, однако со многими оговорками касательно стандартов топлива, интервалов технического обслуживания и режима эксплуатации. Высокое содержание биодобавок в топливе коренным образом меняет процесс его горения. Существует еще одна проблема: разработка стандартов. В нефтяной промышленности и лабораториях нет специалистов, имеющих опыт работы с биологическими материалами. Кроме того, мнения специалистов-химиков, экспертов по двигателям и законодателей относительно того, с какой точки зрения рассматривать биотоплива, весьма далеки от согласия. Существует центр Ricardo, имеющий опыт работы с биотопливом на протяжении около четверти века, и в этой ситуации он становится одним из ключевых источников информации.

В будущем возникнет еще одна проблема. На многих станциях просто будет негде разместить «колонки» для всех видов топлива. Широкий выбор внесет путаницу; будут нередки случаи непреднамеренной заправки автомобилей неверным сортом топлива [8].

Развитие отрасли идет высокими темпами, в скором времени процессы горения биотоплива будут изучены и модернизированы, появятся четкие стандарты на различные сорта топлив. Тогда и только тогда будет возможно говорить о перспективах и сроках реализации различных проектов в сфере биоэнергетики для автомобилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киреева, Н.С. Рапсовое биотопливо [Текст] / Н.С. Киреева.— Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии.— 2008. № 01.— С. 56–57.

2. Романцова, С.В. Исследование фрикционного состава биотоплива, синтезированного из во-

зобновляемого сырья [Текст] / С.В. Романцова, С.В. Бодягина, С.А. Кривец // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки.— 2010. Т. 15. № 1.— С. 72–74.

3. Дмитриев, А.Л. Водородное топливо: экономика и экология [Текст] / А.Л. Дмитриев // ФГУП РНЦ «Прикладная химия».— СПб.

4. Биотопливо из водорослей [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.cleandex.ru/articles/2008/06/19/aglae-biofuels>.

5. Биотопливо в мире и в России [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.cbio.ru/modules/news/article.php?storyid=2735>.

6. Что такое биогаз [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://sintezgaz.org.ua/1_articles/7/chto-takoe-biogaz.

7. В Нидерландах ученые получили биотопливо из соломы [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://aenergy.ru/121>.

8. Автоконцерн Toyota разработал новое биотопливо [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://aenergy.ru/1978>.

9. Биотопливо: добро или зло? [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.cardriver.ru/articles/20821>.

10. Биотопливо — проблемы и перспективы (биоэтанол и производство) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://autorelease.ru/articles/automobile/345-biotoplivo-problemy-i-perspektivy.html>

11. Машинный алкоголизм [Текст] / /Upgrade. — 2010. — № 38. — С. 9.

УДК 626.824:575.2

Т.А. Исабеков, Н.П. Лавров

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОРASПРЕДЕЛЕНИЕМ НА ТРАНСГРАНИЧНОМ ЧУМЫШСКОМ ГИДРОУЗЛЕ

Чумышский гидроузел (ЧГУ) — трансграничное водораспределительное гидротехническое сооружение, служащее для подачи воды в Атбашинский магистральный канал (АМК) и Георгиевский магистральный канал (ГМК) для орошения земель Кыргызской Республики и Республики Казахстан. ЧГУ построен как межгосударственный объект и работает на экономику этих двух центральноазиатских республик.

ЧГУ расположен в нижней части р. Чу на расстоянии 25 км севернее г. Бишкек. В состав ЧГУ (рис. 1) входит: Чумышская плотина, подводящая и отводящая зарегулированное русло р. Чу; сбросной канал Аламединского каскада гидроэлектростанций (АКГЭС); головные участки АМК и ГМК; бассейн суточного перерегулирования (БСП).

Для управления водораспределением на Чумышской плотине должны использоваться данные гидропоста (ГП) Милянфан, находящегося от плотины в 5 км вверх по течению р. Чу, и данные по сбросу воды с Аламудунского каскада гидроэлектростанций. Незарегулированность реки Норус и отсутствие информации о расходе воды в ней привело к неопределенности в отношении притока воды из нее в Чумышское водохранилище. Однако замеры расходов воды, поступающих в сбросной канал АКГЭС после забора ее в вышележащий канал Норус-Аламу-

дун показывают, что величина этих расходов не превышает 10 % от расходов воды в реке Чу.

Емкость Чумышского водохранилища является фактически руслом реки Чу и довольно ограничена по объему. Поэтому в составе Чумышского гидроузла имеется бассейн суточного перерегулирования (БСП). Проектная емкость бассейна — 1 млн м³, однако в связи с заилиением емкость БСП в настоящее время стала гораздо ниже.

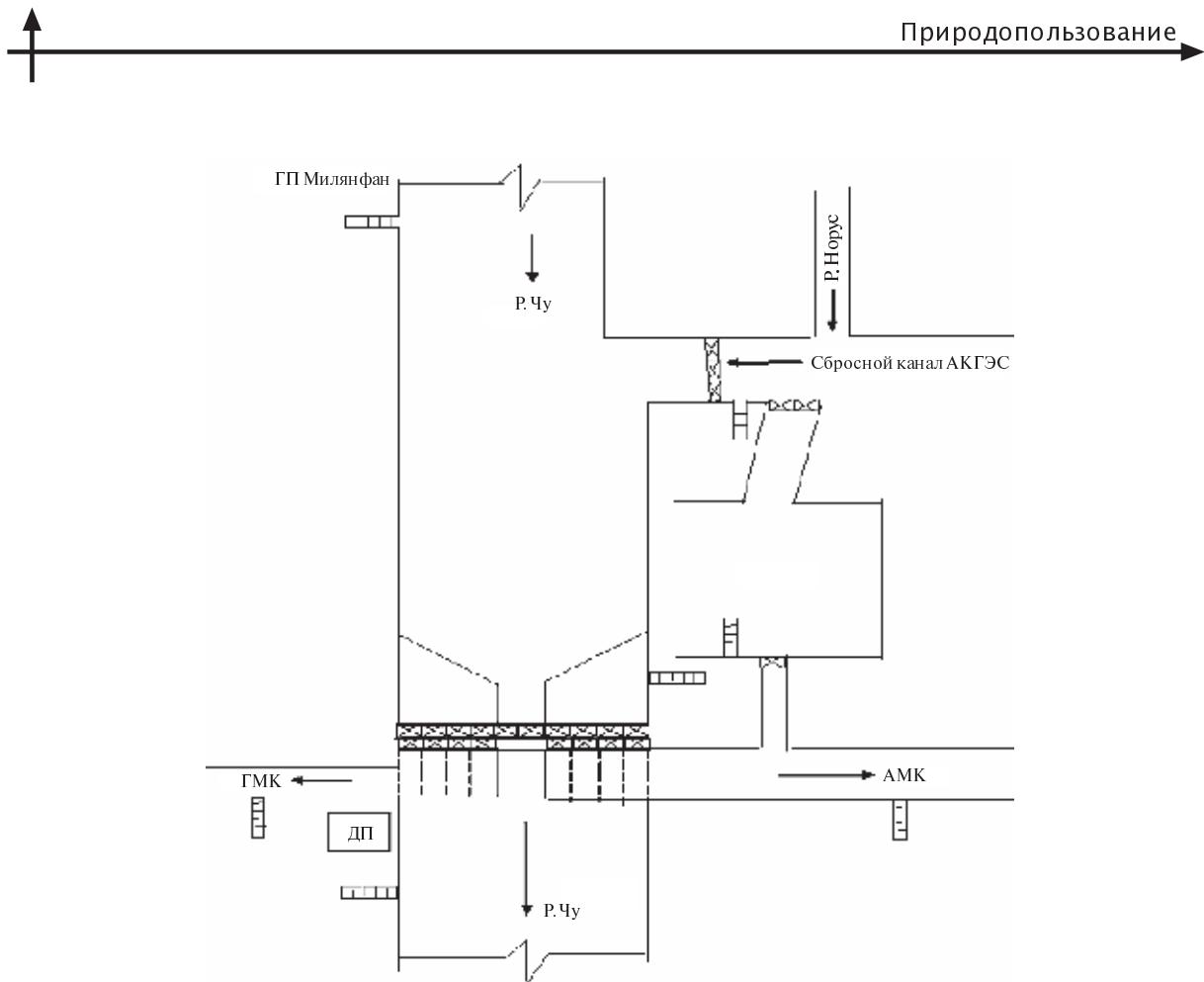
Стратегия алгоритма управления ЧГУ заключается в безусловной подаче воды приграничным водопользователям в соответствии с режимом (планом) водоподачи. В случае недостатка воды этот дефицит должен распределяться по водопользователям в заданных пропорциях, оговоренных межгосударственными соглашениями. Математически данная задача может быть сформулирована в следующем виде:

найти значения переменных $Q_{\text{ГМК}}^{\text{C}}$, $Q_{\text{АМК}}^{\text{C}}$, $Q_{\text{БСП}}^{\text{C}}$, $Q_{\text{Чу}}^{\text{C}}$, $Q_{\text{БСП}}^{\text{П}}$, составляющих минимум целевой функции

$$K_{\text{ГМК}} \left(Q_{\text{ГМК}}^{\text{C}} - P_{\text{ГМК}} \right)^2 + \\ + K_{\text{АМК}} \left(Q_{\text{АМК}}^{\text{C}} + Q_{\text{БСП}}^{\text{C}} - P_{\text{АМК}} \right)^2 + Q_{\text{Чу}}^{\text{C}} \Rightarrow \min, \quad (1)$$

при выполнении следующих условий:

$$Q_{\text{Чу}}^{\text{C}} + Q_{\text{ГМК}}^{\text{C}} + Q_{\text{АМК}}^{\text{C}} + Q_{\text{БСП}}^{\text{П}} - Q_{\text{БСП}}^{\text{C}} = Q_{\text{ПР}}; \quad (2)$$



$$Q_{\text{АМК}}^{\text{C}} + Q_{\text{БСП}}^{\Pi} \leq P_{\text{АМК}}; \quad (3)$$

$$0 \leq Q_{\text{ГМК}}^{\text{C}} \leq P_{\text{ГМК}}; \quad (4)$$

$$0 \leq Q_{\text{БСП}}^{\text{C}} \leq Q_{\text{БСП}}^{\text{Cmax}}; \quad (5)$$

$$0 \leq Q_{\text{БСП}}^{\Pi} \leq Q_{\text{БСП}}^{\Pi\text{max}}; \quad (6)$$

$$0 \leq Q_{\text{АМК}}^{\text{C}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{ГМК}}^{\text{C}}$ — расход водоподачи в Георгиевский канал (Казахстан); $Q_{\text{АМК}}^{\text{C}}$ — расход водоподачи в Атбашинский канал (Киргызстан) непосредственно через затворы Чумышской плотины; $Q_{\text{БСП}}^{\text{C}}$ — расход воды, подаваемой в Атбашинский канал из БСП (сброс воды из БСП); $Q_{\text{Чу}}^{\text{C}}$ — расход сброса воды в р. Чу; $Q_{\text{БСП}}^{\Pi}$ — расход подпитки БСП; $K_{\text{ГМК}}$ и $K_{\text{АМК}}$ — весовые коэффициенты распределения дефицита воды между

потребителями; $P_{\text{ГМК}}$ и $P_{\text{АМК}}$ — плановые задания по подаче воды соответственно в ГМК и АМК, устанавливаемые в соответствии с межправительственным соглашением [1]; $Q_{\text{БСП}}^{\text{Cmax}}$ и $Q_{\text{БСП}}^{\Pi\text{max}}$ — максимально допустимые расходы соответственно сброса из БСП и подпитки БСП.

Выражения (1)–(7) имеют следующий физический смысл. Целевая функция (1) отображает, с одной стороны, необходимость минимизации дефицита расходов воды в Георгиевский и Атбашинский каналы, с другой стороны, — минимизацию сбросов в р. Чу.

Условие (2) является уравнением баланса расходов (водного баланса).

Неравенство (3) отражает необходимость подачи воды в Атбашинский канал с величиной расхода, не превышающей плановое задание.

Неравенство (4) описывает тот факт, что расход воды в ГМК не может быть отрицательным и не должен превышать плановое задание.



Неравенство (5) говорит о том, что расход сброса воды из БСП не может быть отрицательным и одновременно не может превышать максимально допустимое значение, определяемое условиями эксплуатации БСП.

Неравенство (6) описывает ограничение расхода подачи воды в БСП, связанное с условиями его эксплуатации.

Условие (7) введено для недопущения отрицательного значения расхода, подаваемого в АМК непосредственно через плотину.

Описанная модель является задачей квадратичного программирования. Алгоритмы решения таких задач хорошо известны.

Приведенная модель описывает процесс водораспределения при следующих двух условиях:

1) уровень, а следовательно, и объем воды в водохранилище неизменны;

2) резервы воды в БСП и его емкость неограничены.

Поддержание постоянного уровня и объема в водохранилище позволяет свести к минимуму манипуляции затворами гидроузла. Так, при постоянном притоке добавление расхода одному из пользователей вызывает необходимость поднятия затвора (одного или нескольких), регулирующего водоподачу этому пользователю, на величину, соответствующую пропуску дополнительного расхода, и одновременно опускание затворов, уменьшающих пропуск расхода в другой источник воды на эту же величину. В целом система после этих воздействий остается сбалансированной и больше не требует перемещения затворов. При переменном уровне воды в водохранилище система оказывается несбалансированной и постоянно требует манипуляции всеми затворами.

Для большей чувствительности объекта к управляющим воздействиям и создания оперативных резервов воды необходимо стремиться поддерживать максимально допустимый уровень в водохранилище и БСП. Однако такое стремление не должно быть в ущерб безопасности эксплуатации объекта. Максимально допустимый уровень водохранилища должен определяться именно условиями безопасности эксплуатации. Его значение необходимо определять, учитывая:

время реакции системы, которое складывается из времени реакции обслуживающего персонала на возникновение форс-мажорного обстоятельства и времени открытия затворов для

пропуска максимального расхода. Причем время на открытие затворов должно оцениваться из условий ручного подъема затворов, так как именно в этой ситуации может отсутствовать напряжение в электрической сети. Время реакции системы может быть определено простым хронометражем;

максимальный расход, который необходимо пропустить через плотину. Он может быть определен по многолетнему ряду данных для рассматриваемого промежутка времени.

Таким образом, незаполненная емкость водохранилища для максимально допустимого уровня должна быть не меньше произведения времени реакции системы на максимальный расход воды, который может возникнуть в это время года.

Для определения уровня максимально допустимого заполнения водохранилища необходимо знать функцию, описывающую зависимость объема водохранилища от уровня, $W = W(H(T))$.

Отсутствие ограничения на объем и резерв воды в БСП требует проанализировать решение задачи (1)–(7), в частности полученные величины $Q_{БСП}^{\Pi}$ и $Q_{БСП}^C$. Решение задачи будет физически допустимым, пока выполняются неравенства:

при сработке БСП

$$T_C \leq (W_{БСП} - W_{\min}) / (Q_{БСП}^C - Q_{БСП}^{\Pi}); \quad (8)$$

при заполнении БСП

$$T_{\Pi} \leq (W_{\max} - W_{БСП}) / (Q_{БСП}^{\Pi} - Q_{БСП}^C), \quad (9)$$

где $W_{БСП}$ — объем воды в БСП в момент решения задачи; T_C — время сработки БСП до минимального объема W_{\min} ; T_{Π} — время заполнения БСП до максимального объема W_{\max} .

По истечению промежутка времени T_C при сработке БСП необходимо просто перейти к пропорциональному сокращению расходов подачи воды водопользователям при нулевом сбросе в реку Чу и в БСП. В этот момент наступает состояние системы, при котором все резервы воды исчерпаны и наблюдается явный дефицит притока.

Через промежуток времени T_{Π} бассейн БСП будет полностью заполнен, и дальнейшее решение этой задачи тривиально. Оно состоит в подаче воды водопользователям в соответствии с плановыми показателями. Остатки воды сбрасываются в р. Чу.



Алгоритм регулирования на Чумышском гидроузле можно представить в следующем виде:

При возникновении избыточного расхода притока воды к Чумышскому гидроузлу (наблюдается рост уровня водохранилища) необходимо весь этот избыточный расход направлять на заполнение БСП, а при заполненном состоянии БСП — сбрасывать в р. Чу. Именно для этого

в целевой функции (2) введено слагаемое $Q_{\text{Чу}}^C$. Величина избыточного расхода определяется по формуле (6).

При недостаточном расходе притока в водохранилище, когда наблюдается снижение его уровня, необходимо в первую очередь это компенсировать за счет уменьшения сброса в р. Чу. Если это не удается сделать (например, сброс в р. Чу отсутствует или недостаточен), то производится компенсация за счет расхода, идущего на заполнение БСП; если эти мероприятия не могут привести к стабилизации уровня в водохранилище, то производится сокращение расхода подачи из водохранилища в Атбашинский канал с одновременным добавлением такого же расхода в Атбашинский канал из БСП. В случае недостатка воды в БСП делается заключение о дефиците притока воды, и алгоритм должен предусматривать пропорциональное деление полученного дефицита между водопользователями. Расчет дефицита притока воды производится по формуле

$$Q_{\text{Вдх}} \approx (W(H(T_1)) - W(H(T_0)))/(H(T_1) - H(T_0))(H(T_1) - H(T_0))/(T_1 - T_0), \quad (10)$$

где H — уровень водохранилища; T — переменная времени; $W(T)$ — функция, описывающая изменение уровня во времени.

Сделанные выводы подтверждают необходимость содержания БСП в заполненном состоянии. Вода, накопленная в водохранилище и БСП, позволяет сглаживать неравномерность расхода притока, которая может возникать в процессе эксплуатации гидроузла.

Расчет величины открытия затвора для подачи заданного расхода воды можно производить путем решения уравнения, описывающего зависимость величины расхода от уровня верхнего бьефа и открытия затвора. Такие зависимости известны в гидравлике [2]:

$$Q = \varphi b \varepsilon a (2gH)^{0.5} / (1 + \varepsilon a/H)^{0.5}, \quad (11)$$

где Q — расход воды при истечении из-под затвора; φ — поправочный коэффициент (коэффи-

циент скорости), учитывающий влияние потерь напора. Принимается по таблице 5–4 из справочника [2]. Величина коэффициента φ может уточняться в процессе эксплуатации системы; b — ширина затвора; ε — коэффициент сжатия струи; a — величина открытия затвора; g — ускорение свободного падения; H — напор воды перед затвором (уровень водохранилища).

Величина коэффициента сжатия струи ε выбирается из составленной по данным [2] таблицы:

a/H	ε
0,10	0,615
0,15	0,618
0,20	0,620
0,25	0,622
0,30	0,625
0,35	0,628
0,40	0,630
0,45	0,638
0,50	0,645
0,55	0,650
0,60	0,660
0,65	0,675
0,70	0,690
0,75	0,705
0,80	0,720
0,85	0,745
0,90	0,780
0,835	0,95
1,00	1,000

При известной величине расхода Q решение уравнения (11) относительно a (величина открытия затвора) дает следующую формулу для определения нового положения затвора:

$$a = \varepsilon Q^2 / H + \left(Q^4 \varepsilon^2 / H^2 + 8Q^2 \varphi^2 b^2 \varepsilon^2 g H \right)^{0.5} / \\ / \left(4\varphi^2 b^2 \varepsilon^2 g H \right). \quad (12)$$

Использование формулы (12) может привести к результату, который описывает новое положение затвора за пределами возможного, что свидетельствует о необходимости манипуляции не одним, а несколькими затворами. Порядок манипуляциями несколькими затворами может быть определен на основании дополнительных соглашений. Например, может быть выдвинуто требование равномерного открытия всех затворов. В этом случае расход, который необходимо пропустить в заданном направлении, делится на количество затворов, и далее рассчитывается

положение всех затворов. В такой постановке любое изменение расхода воды в заданном направлении ведет к необходимости последовательного или одновременного манипулирования всеми затворами.

Возможно и другое решение этой задачи. Например, при манипуляциях затворами целесообразно в первую очередь опускать затвор с наибольшим открытием или поднимать затвор, имеющий наименьшее открытие.

Такая постановка задачи сводит к минимуму манипуляции затворами, но может вызвать неравномерное распределение струи и удельного расхода в русле. Конечно, могут возникать и особые условия управления затворами, например

при отложении призмы наносов, ликвидация которой возможна только при наибольшем открытии определенного затвора.

Программная реализация предлагаемого алгоритма при существующем автоматизированном управлении Чумышским гидроузлом позволит оптимизировать управление водораспределением на данном трансграничном объекте. При этом должна быть предусмотрена возможность производить оперативное отключение затворов, манипуляция которыми в данный момент нежелательна, а при необходимости — предоставлять диспетчеру возможность самостоятельного выполнения маневрирования выбранными им затворами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соглашение между Правительством Кыргызской Республики и Правительством Республики Казахстан об использовании водохозяйственных сооружений межгосударственного пользования на ре-

ках Чу и Талас от 21 января 2000 г [Текст] / Астана.

2. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / Под ред. П.Г. Киселева.— М.: Энергия, 1974. — 313 с.

УДК 665.3:541.69

*Б.И. Иголкин, Л.К. Васильева, В.В. Васипов,
К.Ю. Ребане, В.С. Мехтиев*

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Растительные масла — важнейшие продовольственные товары первой необходимости, а также незаменимое сырье для пищевой, химической, парфюмерной, лакокрасочной промышленностей. Их производство возрастает каждый год, увеличивается и импорт масел.

Растущий объем потребления растительных масел и необходимость обеспечения заданных потребительских свойств получаемых продуктов требуют совершенствования методов контроля процессов их производства, перевозки, хранения и реализации.

К оперативным дистанционным методам контроля и управления технологическим процессом на всем жизненном цикле жидких веществ относятся электрофизические способы [1, 2]. В нашей

работе использовался метод определения электропроводности жидких диэлектриков, состоящий в измерениях с помощью трехэлектродного датчика, согласованного коаксиальным кабелем с электронным блоком. В рабочем объеме датчика на жидкость воздействует электромагнитное ($\mathcal{E}/\text{м}$) поле с дискретно контролируемой частотой от 1,0 до 100 кГц. Температура масла при терmostатировании изменялась в пределах от 20 до 70 °C с помощью термостата LT-108.

Объектом исследования были продукты отдельных стадий технологического процесса производства растительного подсолнечного масла, предоставленные ОАО «ЭФКО», а также некоторые виды растительных масел, приобретенные в розничной торговой сети.



В таблице в качестве примера приведены зависимости активные электропроводности G_p , нСм, и электрические емкости C_p , пФ, четырех видов растительных масел в зависимости от частоты воздействия f , кГц, для двух граничных значений температур. Значения электропроводности и электрической емкости снимались непосредственно с экрана монитора электронного блока. Расчет удельной электропроводности исследуемых жидкостей, См/м, выполняется с учетом геометрической постоянной преобразователя (датчика) $K = 0,97 \text{ м}^{-1}$.

Из таблицы видно, что электрическая емкость масел мало изменяется в исследованном диапазоне частот и температур. Измерения электропроводности дают существенно больше

Электрофизические показатели некоторых растительных масел

$T, ^\circ\text{C}$	$f, \text{кГц}$	$C_p, \text{пФ}$	$G_p, \text{нСм}$
<i>Насыщенные масла «Сембак» (растительное, семенное, натуральное)</i>			
21	30	30,10	9,47
	40	30,11	11,82
	50	30,12	14,53
	60	30,15	15,73
	70	30,18	21,28
	80	30,19	27,92
	90	30,20	38,32
	100	30,21	52,04
68	30	28,66	3,17
	40	28,66	14,41
	50	28,68	22,87
	60	28,73	23,82
	70	28,75	25,45
	80	28,76	30,80
	90	28,76	37,15
	100	28,76	43,41
<i>Насыщенные масла «Жигулевское» (растительное, натуральное, рафинированное)</i>			
30	20	29,89	0,703
	30	29,90	2,08
	40	29,88	2,61
	50	29,88	8,63
	60	29,89	16,6
	70	29,90	29,7
	80	29,92	47,6
	90	29,94	66,6
	100	29,99	82,4

Окончание табл.

$T, ^\circ\text{C}$	$f, \text{кГц}$	$C_p, \text{пФ}$	$G_p, \text{нСм}$
80	20	28,61	1,45
	30	28,66	2,78
	40	28,61	2,65
	50	28,59	8,44
	60	28,60	15,72
	70	28,59	27,34
	80	28,60	43,21
	90	28,62	60,1
	100	28,65	74,2
	<i>Масло льняное «Горицвет» (растительное)</i>		
25	10	29,75	3,938
	20	29,72	4,75
	30	29,73	7,25
	40	29,73	8,88
	50	29,73	15,59
	60	29,74	24,52
	70	29,75	38,51
	80	29,77	57,29
	90	29,79	77,7
	100	29,84	97,0
78	10	28,13	15,56
	20	28,09	16,55
	30	28,08	25,80
	40	28,09	28,98
	50	28,09	35,42
	60	28,12	35,52
	70	28,14	41,97
	80	28,14	51,27
	90	28,15	62,83
	100	28,16	79,67
<i>Масло горчицовое «Астрахань» (растительное, семенное, натуральное)</i>			
21	25	30,65	7,81
	30	30,65	8,95
	40	30,67	10,84
	50	30,68	13,34
	60	30,71	14,01
	70	30,71	19,18
	80	30,75	25,65
	90	30,76	36,26
	100	30,76	50,91
	<i>Масло подсолнечное «Башкирское»</i>		
68	—	—	—
	—	—	—
	45	29,21	1,34
	50	29,20	5,11
	60	29,21	14,33
	70	29,23	26,6
	80	29,26	38,10
	90	29,28	48,70
	100	29,28	46,40

информации. Поэтому далее при анализе рассматривались изменения активной электропроводности.

На рис. 1–4 приведены частотно-температурные зависимости активной электропроводности G_p , построенные по данным таблицы.

Анализ хода кривых частотно-температурных зависимостей растительных масел, представленных на рисунках, а также графиков для других растительных масел, не представленных в данном сообщении, позволяет отметить следующие их особенности.

Для всех исследованных жидкостей характерно наличие точки пересечения кривых частотной зависимости активной электропроводности при различных температурах. Как правило, имеется одна такая точка, присущая только этому виду растительного масла. Однако для некоторых из исследованных масел (подсолнечное рафинированное дезодорированное вымороженное «Слобода», оливковое «Coopoliva oliv oil PURE») наблюдаются две точки пересечения кривых. Дополнительная точка, также характеризующая только этот вид масла, расположена при более низкой частоте по отношению к основной и соответствует более низкой активной электропроводности.

Наличие точки пересечения свидетельствует о существовании эффекта независимости электропроводности от температуры при конкретной (для каждого масла) частоте колебаний внешнего электромагнитного поля. Таким образом,

подтверждается вывод патента [1] о возможности надежной идентификации рода жидкости, в частности рода растительных масел. В то же время точки пересечения кривых можно рассматривать как параметр, выделяющий известные виды растительных масел (подсолнечное, кукурузное, оливковое и т. д.) внутри жидкости данного рода (растительные масла). Более детально этот вопрос будет рассмотрен в следующих сообщениях.

Как видно из графиков, рассматриваемая точка образуется в силу различного наклона графиков зависимостей активной электропроводности от частоты при заданных в эксперименте пограничных температурах (20–21 и 68–70 °C). Будем называть кривую, соответствующую 20–21 °C, низкотемпературной ветвью, а кривую, соответствующую 68–70 °C, высокотемпературной ветвью зависимости электропроводности от частоты. Как правило, низкотемпературная ветвь на подходе к точке пересечения со стороны низких частот располагается ниже высокотемпературной ветви. За точкой пересечения происходит инверсия хода кривых, и высокотемпературная ветвь идет ниже низкотемпературной. При этом наклон обеих ветвей, или темп нарастания электропроводности с частотой, сохраняется в высокочастотной области для всех растительных масел. Анализ полученных в экспериментах кривых показывает также, что высокотемпературная ветвь имеет сложную конфигурацию в области низких частот и для отдельных масел проходит ниже высокотемпературной ветви,

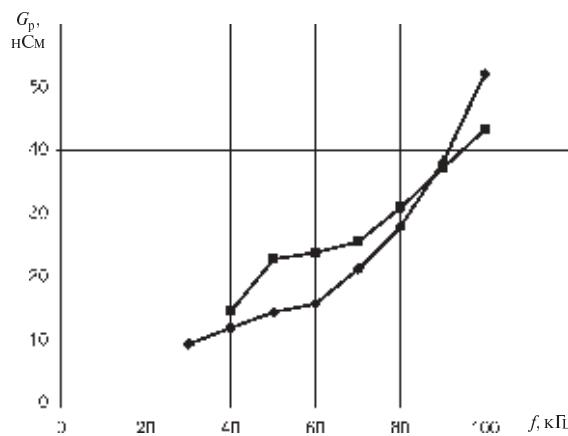


Рис. 1. Зависимости активной проводимости масла «Слобода» от частоты электромагнитного поля при двух температурах
(—●— при 21 °C, —■— при 21 °C)

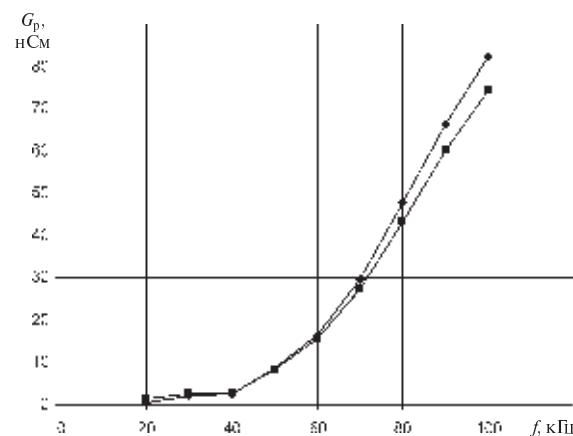


Рис. 2. Зависимости активной проводимости масла «Золотая семечка» от частоты при двух температурах
(—●— при 30 °C, —■— при 80 °C)

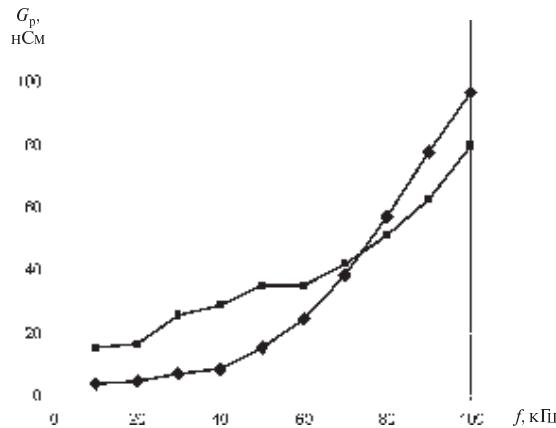


Рис. 3. Зависимости активной проводимости масла «Горчичное» от частоты при двух температурах
—●— при 25 °C, —■— при 78 °C

образуя нижнюю точку пересечения, сохраняя рост электропроводности с увеличением частоты. Отметим, что для кукурузного масла марки «Милора» единственная имеющаяся точка пересечения образуется именно по такому механизму (рис. 4).

Физический механизм, объясняющий поведение кривых, достаточно сложен, но в первом приближении его можно раскрыть, совместив в определенной мере представления традиционной электромагнитной теории Максвелла и современной теории электромагнетизма [3, 5]. Можно говорить, например, о наличии двух почти равноправных причин, которые обеспечивают существование небольшой электропроводности диэлектриков в переменном электрическом поле. Первая связана с наличием в каждой жидкости некоторого числа свободных зарядов электронов и ионов. Они обеспечивают классический ток проводимости, величина которого зависит и от частоты, и от температуры. Само число свободных зарядов существенно растет с частотой, и, следовательно, с ее ростом значительно увеличивается электропроводность. При высоких температурах тепловое движение молекул должно препятствовать прохождению свободных зарядов, и соответственно ток проводимости не является существенным.

Вторая часть тока обеспечивается токами смещения, связанными с поляризацией и перестройкой внутренних молекулярных структур. Эта часть в меньшей степени зависит от частоты электрического поля и в большей — от темпера-

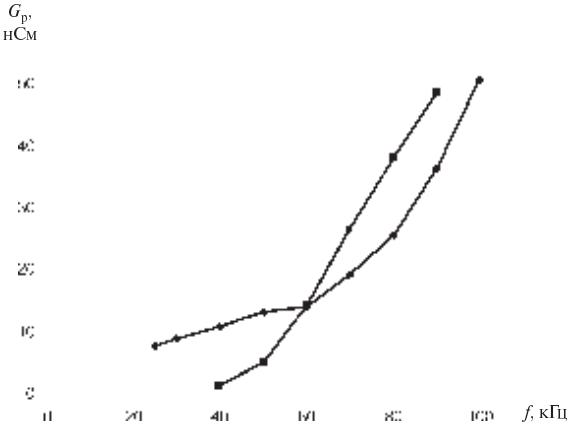


Рис. 4. Зависимости активной проводимости масла «Милора» от частоты при двух температурах
—●— при 21 °C, —■— при 68 °C

туры, которая в состоянии существенно способствовать поляризации и перестройке под действием внешнего электрического поля связанных зарядов рассматриваемых диэлектрических жидкостей. При высоких температурах этот механизм, по-видимому, является определяющим. Он обеспечивает умеренный рост электропроводности при повышении частоты.

Возможно альтернативное объяснение наблюденных эффектов.

Сейчас можно утверждать, что низкотемпературная ветвь электропроводности исследованных растительных масел формируется в основном током свободных зарядов, или током проводимости, который в большей степени зависит от частоты, чем от температуры, и обусловлен плотностью упаковки молекулярной структуры. Кривые высокотемпературной электропроводности своей формой обязаны в основном току связанных зарядов, или току смещения, который в большей степени зависит от молекулярной подвижности элементов структуры, обусловленной температурой, и в меньшей степени — от частоты внешнего электромагнитного поля. Таким образом, при низких температурах основной вклад в общую электропроводность системы вносят токи проводимости и небольшую долю — токи смещения. При повышении температуры возрастает доля токов смещения, которая может превысить долю токов проводимости. В силу перераспределения с ростом температуры токов смещения и проводимости, которые по-разному зависят от частоты, наблюдается различие в наклоне графиков, свидетель-

ствующее о различии в темпах роста активной электропроводности от частоты при разных температурах. Ситуация, когда эти токи становятся равными, соответствует точке пересечения кривых, построенных в координатах «активная электропроводность — частота электромагнитных колебаний». Найденные таким образом характеристическая электропроводность и характеристическая частота электромагнитных колебаний, определяющие электромагнитное состояние конкретного вещества, соответствует только данному составу растительного масла или иной диэлектрической жидкости.

Уточнение физических механизмов наблюдаемого эффекта — предмет дальнейшего исследования и обсуждения.

Для практических целей важно, что у каждого масла или иной диэлектрической жидкости существует характеристическая частота, при которой ее проводимость не зависит от температуры. Это соответствует точке пересечения кривых, построенных в координатах «активная электропроводность — частота электромагнитных коле-

баний». Полагая наиболее отвечающими реальности представления о том, что постоянная величина активной электропроводности при характеристической частоте обусловлена долевым перераспределением с ростом температуры токов проводимости и токов смещения, можно ожидать существование не только частоты, но и температуры, при которой эти токи становятся равными.

Отметим также разнообразие конфигураций высокотемпературных кривых исследованных масел в области частот, меньших характеристической, в частности заметную разницу величин электропроводности по низко- и высокотемпературным кривым при конкретной частоте. Очевидно, что этот факт обусловлен различием температурных зависимостей молекулярной подвижности в маслах разного состава и, следовательно, может быть количественно рассчитан с позиций термоактивационного процесса.

Вопросы определения характеристической температуры и выявления параметров молекулярной подвижности разных видов масел будут рассмотрены в следующих сообщениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на изобретение № 2383010. Способ определения рода жидкостей [Текст] / С.В. Усиков, Н.В. Астратьева, Л.К. Васильева [и др]. 27 февраля 2010 г.
2. Усиков, С.В. Определение электропроводности и диэлектрической проницаемости растворов [Текст] / С.В. Усиков.— СПб.: Теза, 1997.— 179 с.
3. Матвеев, А.Н. Электричество и магнетизм [Текст] / А.Н. Матвеев.— М.: Оникс XXI век: «Мир и образование», 2005.— 464 с.
4. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.— М.: ГИФМЛ, 1959.— 532 с.
5. Канаев, Ф.М. Начала физхимии микромира.: Т. 1 [Текст] / Ф.М. Канаев / ФГОУ ВПО «Кубанский ГАУ».— 2008.— 292 с.



БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 327:327.5:355.019

И.Ф. Кефели

ГЛОБАЛЬНОЕ ОРУЖИЕ: ПРЕДЫСТОРИЯ И РЕАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОСТИ

Перед нами — новые горизонты глобального мира, в котором просматриваются контуры глобальной культуры и глобальной идеологии. Ретроспективный взгляд в прошлое исходит теперь из новой парадигмы — глобальной истории. В ракурсе глобальной экологии получает обоснование концепция устойчивого развития. Ученые и политики ломают копья по поводу поиска целей, средств, механизмов глобального управления и установления нового мирового порядка. Наш мир опутан сетями глобального терроризма, а военные стратеги, аналитики и конструкторы заявляют о создании глобального оружия, которое ждет своего применения в войнах шестого поколения — так называемых сетевых. В мировой политике все более явственно просматривается переход от силовой геополитики, зародившейся на рубеже XIX—XX веков и олицетворявшей передел мира между колониальными державами и мировые войны, к геополитике глобальной. В ее недрах формируется императив дальнейшего развития мира как единства геоцивилизаций — «больших странств», динамичное развитие которых служит залогом сохранения человечества. В русле научных дискуссий по различным аспектам глобализации находили, казалось бы, логичное объяснение и крах реального социализма, который породил, как потом стало ясно, иллюзию победы либеральных ценностей в мировом масштабе, и ускоряющаяся региональная интеграция, представлявшаяся уверенными шагами в продвижении к информационному обществу, и растущий культурный обмен между некоторыми странами периферии мировой системы и ее центром — государствами «золотого миллиарда», и ряд других глобальных социально-экономических проблем. Остановимся на одной из линий горизонта нашего глобального мира — на глобальном оружии.

Атомное оружие — первый шаг в создании глобального оружия. В 1940 году в Академии наук СССР была создана комиссия по проблеме урана, объединившая работу ряда научно-исследовательских институтов в области физики атомного ядра. После начала Великой Отечественной войны практически все работы в области ядерной физики были временно прекращены. Только в 1943 году была принята программа изучения возможности создания ядерного оружия, реализация которой было связана с появившимися у советского руководства сведениями о том, что Великобритания и США уже ведут работы в этом направлении. В апреле 1943 года была образована Лаборатория № 2, положившая начало советскому атомному проекту, а уже 29 августа 1949 года было проведено испытание первого советского ядерного устройства. К концу 50-х годов СССР обладал значительным арсеналом ядерных боезарядов и средств доставки, которые позволяли использовать ядерное оружие в пределах театров военных действий. Тогда же основные усилия Советского Союза были направлены на создание средств доставки, обладающих межконтинентальной дальностью и способных обеспечить нанесение удара по территории США. Отражение угрозы ядерного нападения со стороны США определило необходимость создания межконтинентальных средств доставки ядерного оружия. Удачное испытание межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) Р-7 (SS-6) и ее использование осенью 1957 года для запусков первых искусственных спутников Земли продемонстрировали лидерство Советского Союза в области создания баллистических ракет. В декабре 1959 года был образован новый вид Вооруженных сил — Ракетные войска стратегического назначения. Программа строитель-

ства стратегических сил, осуществленная в 60-х годах, позволила Советскому Союзу добиться примерного равенства с США по количеству стратегических носителей, хотя советские стратегические силы в начале 70-х годов все еще заметно уступали группировке стратегических сил США по боевой эффективности.

В 1982 году СССР первым объявил об отказе от применения ядерного оружия. В те годы в Институте прикладной математики АН СССР, который возглавлял академик М.В. Келдыш, родилась идея ограничения стратегических вооружений и систем противоракетной обороны — одна из наиболее глубоких и важных идей XX века. Эта идея, выдвинутая М.В. Келдышем, Д.Ф. Устиновым, А.А. Громыко и Ю.В. Андроповым, на десятилетия определила повестку дня для диалога сверхдержав. Она позволила сэкономить гигантские ресурсы, повысить уровень доверия в мировом сообществе и, в конечном итоге, обеспечила много лет мирного сосуществования, без кризисов, выходящих на военно-стратегический уровень. С.П. Курдюмов, сотрудник М.В. Келдыша, одним из первых среди ученых научно обосновал идею: ядерное оружие вместо гаранта стабильности может превратиться в свою противоположность. Тогда такие суждения ученого казались парадоксом. Идея, что наш мир нелинеен, способен к парадоксальному поведению, уже тогда представлялась очевидной, но ее применение к конкретным реалиям воспринималось неоднозначно. В самом деле, паритет стратегических вооружений, обеспечивший полвека мира, исходил из возможности каждой из сторон нанести другой неприемлемый ущерб на любой стадии конфликта. Это и уберегает каждую из сторон от соблазна такой конфликт начать. Однако предположим, что в процессе сокращения вооружений, пусть даже симметричном, взаимном и контролируемом, достигнут некоторый критический порог. При этом каждая из сторон может нанести неприемлемый ущерб в первом, обезоруживающем ударе. Но не может сделать это, нанося ответный удар. И тогда появляется соблазн нанести удар первыми [1]. Кстати говоря, эти идеи С.П. Курдюмова и целой плеяды отечественных ученых стали основой зарождения нового научного направления — сингергетики (в те же годы развитие этого направления инициировалось за рубежом И.Р. Пригожиным и Г. Хакеном).

Предложения о сокращении стратегических вооружений и средств средней дальности были выдвинуты Советским Союзом в ходе советско-американской встречи в верхах в Рейкьявике, состоявшейся в октябре 1986 года. В ходе этой встречи была достигнута принципиальная договоренность о сокращении наполовину всех компонентов стратегических сил, в том числе советских тяжелых ракет. После распада Советского Союза в конце 1991 года и образования Содружества Независимых Государств основная часть инфраструктуры стратегических сил и ядерного комплекса, а также большинство стратегических носителей ядерного оружия оказались на территории России. К концу 1996 года все ядерные боезаряды, ранее находившиеся на территории Казахстана, Украины и Белоруссии, были переведены на территорию России. В настоящее время СЯС Российской Федерации представлена классической триадой в составе наземных МБР (стационарный шахтный, подвижный грунтовой и железнодорожный варианты базирования), морских и авиационных стратегических ядерных сил. За период с 1990 до 2002 год общее число носителей элементов триады сократилось с 2500 до 1505 единиц, а ядерных боезарядов — с 10271 до 5518 единиц [2].

8 апреля 2010 года в Праге Дмитрий Медведев и Барак Обама подписали новый Договор между Российской Федерацией и Соединенными Штатами Америки о мерах по дальнейшему сокращению и ограничению стратегических наступательных вооружений (Пражский договор). Договор (срок его действия рассчитан на 10 лет) был подписан взамен Договора о СНВ (ДСНВ) от 1991 года, завершившего свое действие 4 декабря 2009 года. К Договору прилагается также обширный Протокол о мерах по дальнейшему сокращению и ограничению стратегических наступательных вооружений. После подписания Договора и Протокола к нему (см.: «Геополитика и безопасность». 2010. № 4(12). С. 131–145) оба президента провели совместную пресс-конференцию. Барак Обама, в частности, отметил: «Договор предусматривает сильное сокращение развернутого ядерного оружия, сокращает средства доставки примерно вполовину и включает режим контроля, который повышает доверие и придает большую гибкость защите нашей безопасности и способствует обеспечению Америкой безопасности наших европейских союзни-



ков... Мы получили документ, который в полной мере выдерживает баланс интересов России и Соединенных Штатов Америки. Главное, что здесь нет выигравших и проигравших. Победили обе стороны, которые упрочили свою безопасность, а с учетом нашей победы — победило все мировое сообщество. Сегодня наконец-то демонстрируется готовность Соединенных Штатов и России, двух стран, в которых содержатся более 90 процентов мирового ядерного оружия, быть глобально ответственными лидерами. Сегодня мы выполняем наши обязательства в рамках Договора о ядерном нераспространении, который должен стать основой для глобального нераспространения ядерного оружия». Обратим внимание на слова Обамы о балансе интересов двух держав-лидеров и об их глобальной ответственности в деле нераспространения ядерного оружия. Та же мысль следом прозвучала и в выступлении Д.А. Медведева: «В итоге мы получили документ, который в полной мере выдерживает баланс интересов России и Соединенных Штатов Америки. Главное, что здесь нет выигравших и проигравших. Это так называемая *win-win situation*. Я думаю, что это в полной мере характеризует то, что сейчас было сделано. Победили обе стороны, которые упрочили свою безопасность, а с учетом нашей победы — победило все мировое сообщество. Новое соглашение, которое укрепляет глобальную стратегическую стабильность, одновременно способствует переходу на новый, более высокий уровень наших отношений, отношений с Соединенными Штатами Америки» [3]. Однако, несмотря на достигнутые договоренности, современный мир находится подугрозой применения новых глобальных геостратегических концепций и видов глобального оружия, которое приходит на смену ядерному оружию. Согласованным усилиям по установлению ядерного паритета противостоят разрабатываемые американским военным командованием проект «Быстрый глобальный удар», а также геосферное (в том числе климатическое) оружие, которое признается как оружие массового поражения.

Проект «Быстрый глобальный удар» и выбор позиции России. На семинаре в московском Центре Карнеги в июне 2010 года председатель программы по проблемам нераспространения Центра Алексей Арбатов перечислил наиболее значимые проблемы, обуславливающие необходимость нео-

слабного внимания со стороны Москвы и Вашингтона к задаче ядерного разоружения:

баланс сил после окончания в 2020 году срока действия Пражского договора будет характеризоваться тем, что России и США придется заключать новый договор о дальнейшем сокращении ядерных сил, поскольку продлить текущий они не смогут в силу динамики баланса стратегических ядерных сил обеих стран. В настоящее время основную часть СЯС США составляют системы, созданные в 1970-е и введенные в строй в 1980—1990-е годы. В 2020—2030-е годы они будут заменены как на новые стратегические системы в ядерном оснащении, так и на перспективные неядерные вооружения на стратегических носителях. США заинтересованы в том, чтобы следующий российско-американский договор позволил им сократить старые системы и принять на вооружение новые. России же не удастся к 2020 году сохранить свои СЯС на уровне в 1550 ядерных боезарядов, как зафиксировано в Пражском договоре, даже в том случае, если будут продлеваться сроки службы отдельных систем. Поэтому Россия будет заинтересована в новом договоре для того, чтобы поддерживать паритет с США при более низких потолках;

переговоры о дальнейших сокращениях СЯС — необходимое условие для дискуссий по таким вызывающим взаимную обеспокоенность Москвы и Вашингтона проблемам, как противоракетная оборона (ПРО), тактическое ядерное оружие и милитаризация космоса. Эти проблемы будут обостряться по мере продвижения по пути ядерного разоружения;

ограничения СЯС должны быть распространены и на третьи страны — Великобританию, Китай, Францию. Но вести с ними переговоры невозможно, если не будут продолжены двусторонние переговоры России и США по этой проблеме. Если Россия и США сделают этим странам предложение об ограничении СЯС, не подкрепленное собственным примером, они получат жесткий отказ;

ко времени проведения Конференции по рассмотрению Договора о нераспространении ядерного оружия в 2015 году неядерным странам предстоит осознать, что Россия и США практически «сымитировали» сокращения, остановившись на потолках в 1550 боезарядов, и дальнее сокращать СЯС не намерены. Побудить неядерные страны принять более жесткие условия ядерного

нераспространения можно будет только при продолжении российско-американских переговоров о сокращениях [4].

Сохранить и укрепить режим ядерного нераспространения можно будет только в том случае, если Москва и Вашингтон продемонстрируют взаимную транспарентность и приверженность ядерному разоружению. Договор будет оставаться в силе в течение десяти лет, если до истечения этого срока его не заменят последующим соглашением. Но в эти годы будет разворачиваться новая военно-технологическая революция (предшествующая ВТР началась в годы Второй мировой войны и была ознаменована созданием атомного и ракетного оружия, средств радиолокации и электронных вычислительных машин). Новая ВТР получает воплощение в широком спектре военных доктрина и стратегических концепций, которые необходимо предполагают разработку системы глобальной безопасности, включающую технические, организационные и геополитические компоненты. Чем же это вызвано? Дело в том, что военно-политическая элита США в последние годы все более уповаёт на новую стратегическую концепцию — «Быстрый глобальный удар» (БГУ, prompt global strike concept). Суть ее заключается в том, что США в случае возникновения острой необходимости поразить в кратчайшие сроки ограниченное количество как стационарных, так и мобильных целей будут способны применить межконтинентальные баллистические ракеты, размещенные на атомных подводных лодках. Ведь объекты удара могут находиться вне зоны досягаемости американских сил передового базирования (тактическая авиация ВВС и палубная авиация ВМС). К тому же для подготовки и проведения операции потребуется определенное время. Между тем, как известно, МБР или БРПЛ могут доставить боевую нагрузку в течение 30–40 минут практически в любую точку земного шара.

В качестве потенциальных целей для средств, разрабатываемых в рамках концепции БГУ, прежде всего упоминаются базы террористов, а также оказавшиеся под их контролем склады и средства доставки оружия массового поражения. Однако нужно отметить, что Пентагон намерен решать и совсем другие задачи. В том числе: использовать неядерные средства для поражения стратегических объектов — противоспутниковые системы и системы ПВО, баллистические раке-

ты и объекты, содержащие ОМУ, другие очень важные цели, которые могут оказаться уязвимыми на непродолжительное время, включая и командование противника.

По оценкам специалистов, стратегическими средствами в неядерном оснащении могут быть поражены от 10 до 30 % подобных целей. Другими словами, и в неядерном оснащении стратегические носители будут обладать контровым потенциалом, а потому стратегия БГУ, как и планы развертывания ПРО, вызывает справедливую озабоченность российских военных экспертов. Что же представляет собой «Быстрый глобальный удар» и почему в Вашингтоне сочли необходимым принять эту концепцию? На слушаниях в Сенате США (2007 год) генерал Дж. Картройт на вопрос о перспективах Договора по СНВ в связи с новыми средствами, разрабатываемыми согласно концепции БГУ, прямо заявил: «Такое решение позволит сделать более гибкий подход в разработке средств для быстрого глобального удара и в то же время вести поиск путей к сохранению соответствующих мер доверия. В конце концов, мы осуществляя поиск средств, укрепляющих национальную безопасность и позволяющих в меньшей степени опираться на ядерное оружие». Итак, американские военные усматривают в концепции БГУ серьезную альтернативу СЯС.

В настоящее время Россия, основываясь на своем понимании поддержания стратегической стабильности, вряд ли будет согласна обсуждать вопросы нестратегического ядерного оружия (НЯО) без учета ядерных КРМБ большой дальности, противоракетной обороны (ПРО) и высокоточного оружия (ВТО), в которых США имеют превосходство. Для НЯО как самостоятельного класса ядерных вооружений отсутствует какой-либо международный договорно-правовой механизм, требующий их контроля и сокращения, а официальных данных о количестве нестратегических ядерных боезарядов нет. Российская позиция по НЯО строится с учетом общей военно-стратегической ситуации на ее границах и дисбаланса по обычным вооружениям и вооруженным силам в пользу НАТО (на западе) и Китая (на востоке). НЯО США, развернутое в Европе, рассматривается российскими военными как стратегическое, поскольку оно находится в достаточной близости от границ России. Вступление стран Восточной Европы



и некоторых бывших советских республик в НАТО, а также превосходство НАТО в обычных вооружениях усиливают беспокойство России в отношении американского НЯО, размещенного в Европе, и объективно повышают значение ее НЯО в качестве противовеса. Поэтому к переговорам по контролю и сокращению этого класса ядерного оружия можно приступить лишь после того, как американское НЯО будет полностью выведено из Европы [5].

Итак, концепция БГУ в сочетании с глобальной ПРО становится инструментом обретения политического и стратегического доминирования в мире, что является достаточно серьезным фактором, подрывающим принципы взаимного сдерживания и обойдной безопасности, размывающим архитектуру стратегической стабильности.

Справедливо ради надо отметить, что последние годы опасности такого рода стали акцентироваться и в документах, определяющих взгляды военно-политического руководства России. И в Стратегии национальной безопасности РФ до 2020 года, и в Военной доктрине РФ, принятых в 2009–2010 годах, развертывание стратегических неядерных систем высокоточного оружия отнесено к основным внешним военным опасностям для Российской Федерации наряду с созданием и развертыванием стратегической противоракетной обороны и милитаризацией космического пространства. России есть о чем беспокоиться. К 2014–2015 годам в распоряжение Пентагона могут поступить новые виды вооружений, способные выполнять боевые задачи БГУ. Одновременно с формированием концепции и исследованиями идут поиски оптимального организационного решения, а в рамках Стратегического командования США (СТРАТКОМ) со здавались временные командные структуры. Силы БГУ в составе СТРАТКОМ либо в составе ВВС США действуют в тесной координации с другими видами американских ВС в качестве составной части стратегической триады. В августе 2009 года было объявлено о начале функционирования Глобального ударного командования военно-воздушных сил США (Air Force Global Strike Command, AFGSC), в сферу ответственности которого, помимо операций БГУ, с 1 декабря 2009 года включено применение 450 межконтинентальных ракет наземного базирования и частей стратегической авиации.

Хотим мы того или нет, как отмечал Е.В. Мясников на Московской конференции по нераспространению (4–6 марта 2010 года), но в ближайшем десятилетии определять характер взаимоотношений России и США будет взаимное ядерное сдерживание. Обе стороны продолжают оставаться скованными прежними парадигмами, которые определяют структуру и состав ядерных вооружений. Рассматривая условия для дальнейшего сокращения СНВ, стороны будут исходить из того, что в основе соглашений по-прежнему будет лежать критерий выживаемости перспективных стратегических сил в условиях любого мыслимого сценария развития событий, а также **нестратегические ядерные вооружения, противоракетная оборона и стратегические высокоточные вооружения**. И этот вывод актуален прежде всего для России. Угрозу для выживаемости перспективных ядерных сил могут представлять не только стратегические ядерные вооружения и противоракеты потенциального противника, но и обычные вооружения, в первую очередь, что размещены на стратегических носителях и обладают высокой точностью. Некоторые российские эксперты полагают, что существующие технические характеристики высокоточного оружия США уже позволяют использовать его для превентивного уничтожения объектов стратегических ядерных сил. Причем США предполагают использовать высокоточное оружие для решения ряда задач, для которых ранее планировалось применять ядерное оружие. В отношении высокоточного оружия между США и Россией существует дисбаланс, и в перспективе он будет усиливаться. По этой причине ВТО способно оказаться одним из главных препятствий на пути осуществления глубоких сокращений ЯО [6].

Для России ввод в строй сил БГУ может иметь весьма конкретные практические последствия. Фактор БГУ может означать слом пока еще существующей относительной стратегической стабильности. Ядерное сдерживание и устрашение быстро устаревают, становятся неприемлемымrudimentом эпохи конфронтации Восток — Запад. Даже модернизация ядерных арсеналов США и России и доктринальные подтверждения, что ядерные боезаряды остаются в строю и могут быть применены, не снимают ожиданий того, что они никогда не будут использованы и в обозримом будущем государства откажутся от этого вида оружия.

Новые виды глобального оружия и их применение в сетецентрических войнах. В порядке постановки проблемы следует выделить три вопроса: 1) о создании новых видов глобального оружия; 2) об организации и управлении боевыми операциями на глобальном театре военных действий; 3) о принципах организации глобальной безопасности современного мироустройства. Еще в 2002 года В.И. Слипченко достаточно четко определил сложившуюся на рубеже веков ситуацию и выявил в ракурсе «военной футурологии» актуальность данной проблемы: «Экономически развитые страны не только осуществляют непрерывную военно-техническую революцию, но и вышли на рубеж революции в военном деле. Осуществляется новый колоссальный скачок в развитии вооружений, а вследствие этого — в формах и способах вооруженной борьбы и войны в целом. Наступает не только новый период войн оружия высоких технологий, но и период обесценивания роли ядерного оружия, значительного высвобождения человека и живой силы вообще от участия в вооруженной борьбе. Именно военная наука должна уделять внимание прежде всего изучению взаимосвязи между технологическими аспектами и далеко идущими революционными переменами в формах и способах вооруженной борьбы и войн нового поколения» [7]. В первом случае речь идет о принципиально новых видах глобального оружия, в качестве которых следует рассматривать **геосферное и гелиосферное оружие**. В свою очередь разновидностями геосферного оружия являются атмосферное (климатическое), гидросферное и литосферное оружие.

Атмосферное оружие основано на использовании в качестве поражающего фактора искусственно инициированных климатических явлений, как ураганы, ливневые дожди, циклоны, сели, наводнения, смерчи и др.

Гидросферное (гидрофизическое) оружие использует в качестве поражающего фактора также искусственно направляемые гидрофизические явления — цунами, подводные селевые и мутьевые потоки, подводные газогидратные извержения и др.

Литосферное оружие основано на использовании разрушающей энергии землетрясений, извержения вулканов, опускания земной коры, разломов и литосферных сдвигов, пепловысыпания и др.

Гелиосферное оружие занимает особое место во всем многообразии глобального оружия, поскольку его основное предназначение заключается в транспортировке естественной солнечной радиации к поверхности Земли и ее фокусировке над определенным регионом в военных целях. Разновидностями гелиосферного оружия следует считать лазерное и плазменное оружие. Климатическое оружие в нынешних условиях следует рассматривать как оружие массового поражения и разрушения экономики отдельно взятой страны или стран, использующее в качестве поражающего фактора искусственное воздействие на природные ресурсы и климат отдельно взятой территории, страны, государства, материка, континента. Принцип работы климатического оружия основан на принудительном, искусственном воздействии на природные ресурсы и климат в локальном районе земного шара. В качестве механизма «пуска» могут быть использованы изобретения и технологии, обеспечивающие искусственно создаваемые техногенные катастрофы, влекущие за собой экологические катастрофы и, как следствие, создающие экономические проблемы (кризисы). Существование такого оружия, его разработки и применение официально пока не подтверждены, однако многочисленные публикации последнего времени, связанные с климатическими аномалиями, начинают понемногу приоткрывать завесу над этой проблемой. Важно иметь в виду, что отсутствие мировых регламентирующих документов по данной теме повышает вероятность появления и скрытого применения подобного оружия, а также использования его террористическими и антиобщественными группировками. Проблему геосферного и, в частности, климатического оружия необходимо держать в поле пристального внимания ученых, военных специалистов и политиков. Вопросы организации и управления боевыми операциями на глобальном театре военных действий в войнах шестого поколения рассматриваются в ракурсе сетецентрического подхода. Анализ его — тема отдельного исследования. Здесь следует сделать лишь несколько предварительных замечаний.

Во-первых, «сетецентрическая война» — это не совсем точный перевод английского термина «network-centric warfare». Более точный перевод: «сетецентрические военные действия». От неточного перевода идет и неточное понимание или



даже непонимание сути проблемы. И все же термин «сетецентрическая война» уже прижился, и задача теперь заключается не в том, чтобы его изменить, а в том, чтобы его правильно понимать и употреблять. Итак, речь не идет о каком-то новом виде (типе) войны, а о сетецентрическом подходе к организации и ведению военных действий. Более того, в будущем такой подход будет аксиомой, и все военные действия будут неизменно основываться на принципе сетецентричности. Артур Себровски и Джон Гарстка, пожалуй, первыми четко сформулировали основные положения концепции «сетецентрической войны» в статье «Сетецентрическая война: ее происхождение и будущее» (*«Proceedings»*, январь 1998 г.).

Во-вторых, А. Себровски и Дж. Гарстка утверждают, что нынешняя эпоха глобализации, информационных технологий и революции в менеджменте ознаменовалась коренными преобразованиями в мире и обществе, в бизнесе и военном деле. Тот, кто отдает себе отчет в этом, кто не закрывает глаза на происходящие в мире изменения, а стремится активно взять их на вооружение, тот побеждает. Побеждает в бизнесе, побеждает и в войне. По мнению авторов концепции «сетецентрической войны», происходящие в современном мире изменения являются революционными: «Мы переживаем эпоху революции в военном деле, подобной которой не было ничего с эпохи наполеоновских войн, когда Франция впервые претворила в жизнь концепцию массовой армии». Можно спорить с авторами данной концепции, как это справедливо замечает И.М. Попов, по поводу ее революционной сущности, поскольку сетецентрические подходы в той или иной степени широко реализуются в системе государственного управления, бизнесе, экономике и технике. Эти подходы уже давно внедряются и в вооруженных силах разных стран мира, хотя и в ограниченных масштабах. И только единый скординированный подход к внедрению сетецентрических технологий, принципов и методов в деятельности войск позволил говорить об этом явлении как о целостной концепции «сетецентрической войны». В этом целостном подходе и заключается революционная сущность рассматриваемой концепции.

Модель «сетецентрической войны» состоит из трех решеток-подсистем: информационной, сенсорной (разведывательной) и боевой. Основу

этой системы составляет информационная решетка, на которую накладываются взаимно пересекающиеся сенсорная и боевая решетки. Информационная решетка-подсистема пронизывает собой всю систему в полном объеме. Элементами сенсорной подсистемы являются средства разведки («сенсоры»), а элементами боевой решетки — средства поражения («стрелки»). Эти две группы элементов объединяются воедино органами управления и командования. Взаимоотношения между всеми элементами подсистем и самими подсистемами достаточно сложные и многогранные, что позволяет, например, «стрелкам» поражать цели сразу по получении информации от «сенсоров» на основании приказа от органов управления или же самостоятельно. Основанная на данной модели возможная агрессия гипотетического противника, как свидетельствует опыт последних войн и военных конфликтов, проходит в два этапа.

На первом этапе будут наноситься высокоточные воздушно-космические удары на всю глубину территории страны. Военные возможности США позволяют им применять до 1 тысячи крылатых ракет в сутки, не считая авиации ВВС и ВМС. В качестве целей для поражения выбираются критически важные объекты государства-жертвы. Списки приоритетов объектов поражения составляются еще в мирное время исходя из концепции так называемых «пяти колец полковника Уордена» (см. рис.), которая рассматривает противника в качестве системы, состоящей из пяти радиальных колец. В центре — политическое руководство, затем следуют: система жизнеобеспечения; инфраструктура; население; лишь в последнюю очередь — вооруженные силы. Подобная схема уже применялась в ходе агрессии НАТО против Югославии в 1999 году. Целью первого этапа агрессии будет полная дезорганизация системы государственного, экономического, военного управления; «ослепление» системы разведки и ПВО страны; деморализация населения, паника и шок; дезорганизация военных действий государства-жертвы. На втором этапе агрессии осуществляется наземное вторжение, которое начнется только тогда, когда цель первого этапа будет достигнута и если это будет признано необходимым. По сути, это будет зачистка местности [8].

Разработки глобального оружия и сетецентрических войн, по сути дела, ведутся в русле



Приоритеты объектов поражения
«Пять колец» полковника Уордена



обеспечения глобальной безопасности однополярного мироустройства, которое инициируется в основном американскими аналитиками и военными стратегами. Подобное однополярное мироустройство достаточно просто: оно представлено ядром (его образуют США, Западная Европа и их союзники) и периферией (слаборазвитые страны Азии, Африки и Латинской Америки). Между ними располагаются страны с присущей им цивилизационной самобытностью и специфическими политическими режимами, что создает определенные препятствия для полной их интеграции в ядро. К ним относятся Бразилия, Россия, Индия, Китай (БРИК), а также ряд бурно развивающиеся страны Азиатско-Тихоокеанского региона. Для подобного мироустройства ключевой приоритет глобальной безопасности — безопасность центра, сохранение, укрепление и расширение его планетарного

контроля, следуя принципу: «Что хорошо для США, хорошо для всего человечества». Контроль центра над миром как раз и требует новых механизмов и процедур, основанных на сетевом подходе, поскольку полностью интегрировать в однополярное мироустройство все территории и народы центр не способен. Так зародилась идея поддержания «управляемого хаоса» на периферии и сетевой принцип глобального контроля мироустройства-сети.

Подобному сценарию противостоит обретающий все более четкие контуры сценарий многополярного мироустройства, акторами становления и устойчивого развития которого выступают геоцивилизации [9]. Именно последним предстоит оппонировать однополярным инициативам в области обеспечения глобальной безопасности и (здесь я солидарен с А. Г. Дугиным) организовать «зону своего приоритетного влияния, вклю-



чая политическую, мировоззренческую, социальную, культурную, языковую и экономическую модель — Pax China, Pax Indiana, Pax Russica, Pax Latino-American и т. д. Границы между ними пройдут не по линии ныне существующих государственных рубежей, но по иным, более гибким и менее формализованным признакам (язык, этнос, культура, хозяйственная модель, религия и т. д.)» [10]. Здесь необходима выработка комплексных и в чем-то асимметричных ответов. Это

и обсуждение проблемы в СБ ООН, других международных организациях, зачисление геофизического и психотронного оружия в категорию оружия массового уничтожения и распространение на таковые соответствующих международных норм и правил, организация и поддержка широкого общественного движения против вмешательства в природные процессы и установление международного контроля над проводимыми исследованиями в этой сфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев, А.И. Проектирование будущего. Кризис и идеи С.П. Курдюмова [Текст] / А.И. Агеев, В.С. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий // Экономические стратегии.— 2009. № 4.
2. [Электронный ресурс] <http://www.armscontrol.ru/start/rus/>; <http://www.armscontrol.ru/rus/default.htm> (официальный сайт Центра по изучению проблем разоружения, энергетики и экологии МФТИ)
3. [Электронный ресурс]: <http://www.kremlin.ru/news/7396>
4. [Электронный ресурс]: <http://www.carnegie.ru/?fa=2997> (официальный сайт Московского центра Карнеги)
5. Дьяков, А.С. К вопросу о дальнейших сокращениях ядерных вооружений [Электронный ресурс] / А.С. Дьяков, Т.Т. Кадышев, Е.В. Мясников // <http://www.armcontrol.ru/rus/default.htm> (официальный сайт Центра по изучению проблем разоружения, энергетики и экологии МФТИ)
6. Мясников, Е.В. Новый договор СНВ и дальнейшие сокращения ядерных вооружений [Электронный ресурс] / Е.В. Мясников // <http://www.armcontrol.ru/rus> (официальный сайт Центра по изучению проблем разоружения, энергетики и экологии МФТИ)
7. Слипченко, В.И. Войны шестого поколения. Оружие и военное искусство будущего [Текст] / В.И. Слипченко.— М.: Вече, 2002.— С. 35–36.
8. Попов, И.М. «Сетецентристическая война»: готовы ли к ней Россия? [Электронный ресурс] / И.М. Попов // <http://www.milresource.ru/NCW.html>
9. Глобальная geopolитика [Текст] / Под ред. И.И. Абылгазиева, И.В. Ильина, И.Ф. Кефели.— М.: Изд-во Московского университета, 2010.
10. Дутин, А.Г. Глобальная безопасность [Электронный ресурс] / А.Г. Дутин // <http://konservativizm.org/konservativizm/theory/230210142701.xhtml>

УДК 614.841.34

С.А Бараковских, П.В. Арканов

ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВНОЙ СРЕДЫ ОГНЕЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОЖАРАХ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТАХ

Основная пожарная опасность нефтегазовых объектов — быстрое наступление опасных факторов пожара, в частности воздействие температуры, сильного задымления и высокой токсичности продуктов горения [2]. Для обеспечения пожарной безопасности этих объектов необходимо создание системы противопожарной защиты, которая включает в себя целостный ком-

плекс взаимосвязанных подсистем, представляющих собой конкретное воплощение технических решений, и организацию иных мероприятий, обеспечивающих пожарную безопасность и снижение ущерба от пожара.

Одним из направлений обеспечения пожарной безопасности является конструктивная пожарная защита, которая предполагает ограниче-

ние горючей среды и локализацию пожара за счет применения огнестойких преград. Необходимо иметь в виду, что использование противопожарных преград может привести к возникновению зон, в которых образуются взрывоопасные концентрации газовоздушных смесей, и поэтому устройство должно быть продуваемым во время нормальной эксплуатации оборудования.

Исследованию способов и устройств, препятствующих распространению пожара, посвящено значительное количество экспериментальных и теоретических работ, направленных на уменьшение величины теплового потока за счет твердых материалов и тонкораспыленной воды [3–7]. При горении углеводородов основным средством тушения служит воздушно-механическая пена. Поэтому в работе были обоснованы принципы устройств, предназначенных для ослабления теплового излучения с применением воздушно-механической пены. Ослабить тепловое излучение может конструкция, заполненная в виде двух параллельных плоскостей, пространство между которыми заполнено воздушно-механической пеной. В наших экспериментах параллельные плоскости конструкций, ограничивающей распространение пожара, выполнялись из перфорированного стекломагниевого листа (СМЛ).

При экспериментальной работе с СМЛ определено, что величина перфорации плоскостей из стекломагниевого листа существенно не влияет на время устойчивости пены в такой конструкции, так как общая площадь перфорации на стекломагниевом листе составляет 10 % от всей плоскости. Результаты огневых испытаний показали, что конструкция из СМЛ, заполненная воздушно-механической пеной средней кратности, способна поглощать тепловое излучение на 100 % и препятствовать тепловому потоку в течение 12 минут. При заполнении данной конструкции пеной высокой кратности время ее термического сопротивления увеличивается на 3,3 минуты и составляет 15,3 минуты, затем требуется повторное заполнение конструкции пеной.

Термическое сопротивление зависит от времени устойчивости воздушно-механической пены в конструкции и от ее свойств, что напрямую связано с расходом пенообразователя. Так как пена представляет собой довольно сложную структуру, состоящую из газа и жидких пленок, и соотношение между количеством газа и количеством жидкости в пене может быть различным,

то даже при одинаковой кратности диаметр пузырьков газа и толщина жидких пленок могут быть различными [8]. Распространение тепла вдоль бесконечной неоднородной стенки, заполненной средой (воздушно-механическая пена) с изменяющимися во времени теплофизическими характеристиками (распад воздушно-механической пены), определялось с помощью уравнения теплопроводности

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T,t)\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right), \quad (1)$$

где $c(T)$ — теплоемкость проводящей среды, $\text{м}^2/\text{сек}^2\cdot\text{град}$; $\lambda(T)$ — теплопроводность проводящей среды, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$; $\rho(T)$ — удельная плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Ввиду того, что теплофизические характеристики пены менялись как во времени, так и в пространстве, получить аналитическое решение уравнения (1) оказалось затруднительным. Для его решения использовался численный подход, основанный на методе конечных разностей.

Для расчета температурного поля конструкции была написана программа в среде программирования Delphi, в которой реализован алгоритм численного решения уравнения (1). Результаты счета по этому алгоритму были проверены на решении тестового примера. Численный эксперимент показал, что с увеличением числа интервалов разбиения отрезка в четыре раза ошибка уменьшилась практически в 10 раз.

На следующем этапе оценивали: удельную теплоемкость; коэффициент теплопроводности для пены заданной кратности. Для расчета ограждающей конструкции, в которой в качестве стенок применяется стекломагниевый лист, использовались следующие теплофизические характеристики составной среды. Коэффициент теплопроводности находился по зависимости

$$\lambda = \begin{cases} 0,15 & \text{при } x \leq l_{st}; \\ 0,60 & \text{при } l_{st} < x \leq L + l_{st}; \\ 0,15 & \text{при } x > L + l_{st}, \end{cases}$$

где L, l_{st} — толщины пенного заполнителя и стекломагниевого листа.

Значение теплопроводности для стекломагниевого материала принималось равным среднему из известных по публикациям значений, диапа-



зон которых составляет $\lambda_{st} = 0,08 - 0,21 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Теплопроводность воздушно-механической пены обусловлена теплопроводностью водяной пленки. Плотность стекломагниевого листа принята

$p_{st} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и равна среднему значению для известного диапазона $p_{st} = 800 - 1300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Плотность пены обусловлена числом кратности пены.

Таким образом, суммарная зависимость плотности элементов ограждающей конструкции представлена в виде

$$\rho = \begin{cases} 1000 & \text{при } x \leq l_{st}; \\ 1,3 + 1000/k_p & \text{при } l_{st} < x \leq L + l_{st}; \\ 1000 & \text{при } x > L + l_{st}. \end{cases}$$

Удельная теплоемкость составной среды моделировалась следующим образом

$$c = \begin{cases} 800 & \text{при } x \leq l_{st}; \\ 1000 - 2190 \cdot k_p / 200 & \text{при } l_{st} < x \leq L + l_{st}; \\ 800 & \text{при } x > L + l_{st}, \end{cases}$$

где в качестве удельной теплоемкости стекломагниевого листа принята $c = 800 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, а теп-

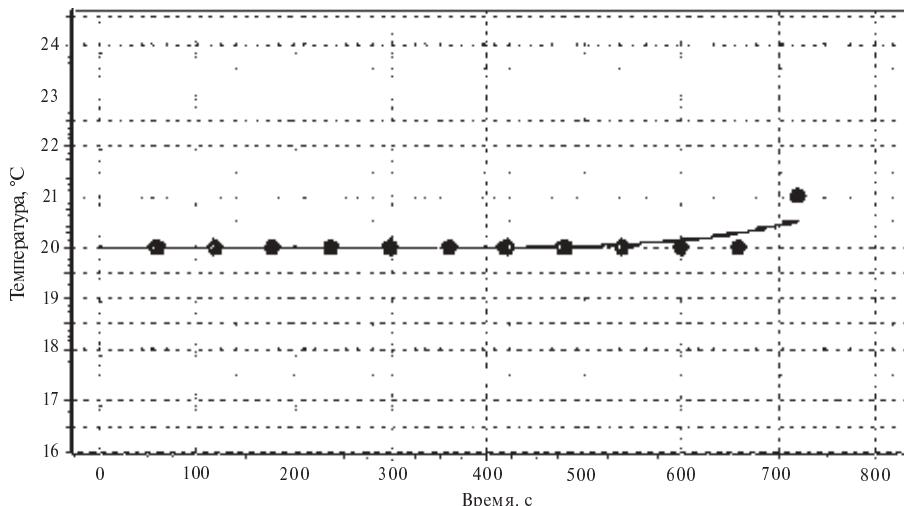


Рис. 1. График зависимости температуры от времени в заданном сечении $x = 0,4$ м на внешней стороне конструкции из СМЛ.

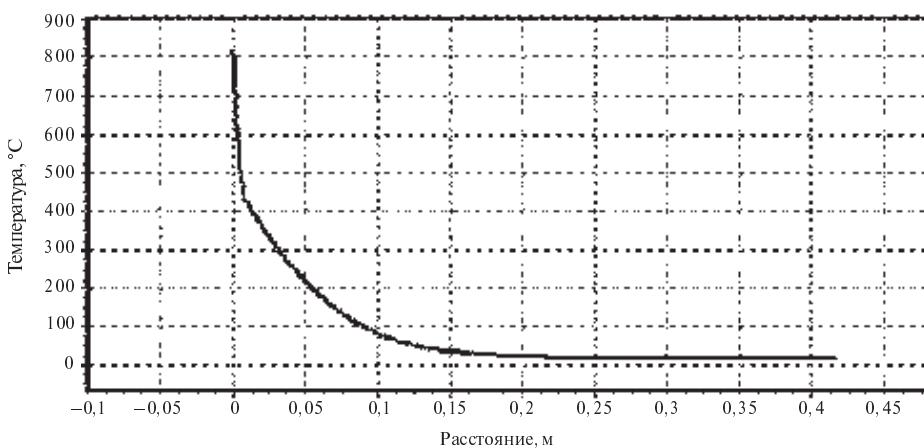


Рис. 2. График зависимости температуры от расстояния при заданном времени

лоемкость пены определялась ее числом кратности k_p . Все расчеты производились при числе кратности пены $k_p = 100$.

На рис. 1 представлена времененная зависимость температуры на внешней стороне конструкции из СМЛ, заполненной пеной средней кратности, и набор экспериментальных точек.

На рис. 2 приведена пространственная зависимость температуры для интервала времени воздействия огня на конструкцию.

Можно заметить, что в течении почти двух минут на первом стекломагниевом листе достигается перепад температур почти в 600 градусов (линейный участок зависимости). К концу две-

надцатой минуты эта разница составляет величину лишь в 100 градусов.

Анализ численных расчетов конструкции из СМЛ показывает, что основное падение температуры происходит в пенном слое на расстоянии 20–30 см, что позволяет заметным образом сократить расход пены, так как остальная часть ограждающей конструкции работает в низком интервале перепада температур. Таким образом, в процессе теплофизического расчета определено время термического сопротивления исследуемых устройств, а также зависимость плотности, теплоемкости и теплопроводности пены; абсолютные величины этих характеристик увязываются с кратностью пены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25380–82. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции [Текст].— Введ. 1983-01-01.— М.: Издательство стандартов, 1988.— 12 с.

2. Котов, Г.М. Противопожарные мероприятия на нефтеперерабатывающих заводах [Текст] / Г.М. Котов, О.М. Волков, В.П. Пустомельник.— М.: Стройиздат, 1981.— 111 с., ил.

3. Пат. 2247584 Российская Федерация, МПК7 A62C2/08. Способ создания противопожарной завесы и экранирующие устройства [Текст] / Брушлинский Н.Н., Серебренников Е.А., Копылов Н.П. [и др.]. Заявитель и патентообладатель — Всерос. науч.-исслед. инт. противопожарной обороны МВД России.— № 2002135802/12; заявл. 2002.12.30; опубл. 2005.03.10.

4. Пат. 2182025 Российская Федерация, МПК7 A62C2/08. Огнезащитное ограждение [Текст] / Усманов М.Х., Брушлинский Н.Н., Касымов Ю.У. [и др.].— Заявитель и патентообладатель — Усманов М.Х.— № 2000105810/12; заявл. 2000.03.13; опубл. 2002.05.10.

5. Пат. 2182024 Российская Федерация, МПК7 A62C2/08, A62C35/68. Способ ослабления потока энергии в виде

света, тепла и конвективных газовых потоков и устройство к лафетному стволу для создания защитного экрана от потока энергии в виде света, тепла и конвективных газовых потоков [Текст] / Усманов М.Х., Брушлинский Н.Н., Аблзис Р.А. [и др.].— Заявители и патентообладатели — Усманов М.Х., Брушлинский Н.Н., Аблзис Р.А., Касымов Ю.У., Копылов Н.П., Садыков Ш.Н., Серебренников Е.А., Сабиров М., Худоев А.Д.— № 2000105809/12; заявл. 2000.03.13; опубл. 2002.05.10.

6. Пат. 2156628 Российская Федерация, МПК7 A62C2/08. Способ создания противопожарной завесы [Текст] / Усманов М.Х., Копылов Н.П., Серебренников Е.А. [и др.].— Заявитель и патентообладатель — Всерос. науч.-исслед. инт. противопожарной обороны МВД России.— № 99114862/12; заявл. 1999.07.07; опубл. 2000.09.27.

7. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве [Текст] / М.Я. Ройтман.— 2-е изд., доп.— М.: Стройиздат, 1985.— 590 с., ил.

8. Шароварников, А.Ф. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение [Текст] / А.Ф. Шароварников, С.А. Шароварников.— М.: Пожнаука, 2005.— 335 с.

УДК 621.039.566

В.И. Гуменюк, Г.Л. Атоян, А.А. Сыров

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ И МИНИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

Процесс перегрузки ядерного топлива (ЯТ) на современных реакторах типа ВВЭР (водо-водяные энергетические реакторы) атомных электростанций (АЭС) — опасный производствен-

ный процесс, имеющий ряд технологических особенностей.

Перестановка топливных элементов, загрузка — выгрузка топлива, а также проведение не-



которых других операций по ремонту и обслуживанию реактора осуществляются с помощью машины перегрузочной (МП), которая предусмотрена в составе каждого энергоблока АЭС.

В данной работе рассматривается МП, модернизированная на предприятии ЗАО «Диаконт» (г. Санкт-Петербург), которая предназначена для автоматизации указанных процессов. Исследования и работы по увеличению скоростей перемещения ЯТ проводились ранее ФГУП ОКБ «Гидропресс», а работы по повышению прочности и жесткости тепловыделяющих сборок (ТВС) — ФГУП «ОКБМ».

Модернизация ряда АЭС, которую проводит в последние годы ЗАО «Диаконт», направлена на повышение безопасности технико-технологического оборудования,участвующего в процессе перегрузки ЯТ, коэффициента использования установленной мощности (КИУМ). Благодаря автоматизации реализовано управление процессом перегрузки с целью сокращения времени перегрузки ЯТ и обеспечения защищенности перегружаемого оборудования, а следовательно, и безопасности объекта атомной энергетики. Однако МП требует совместной оптимизации проектных решений — с позиций как самой МП, так и перегружаемого оборудования (ЯТ), поскольку и при эксплуатации МП, и при работе с ЯТ возможны эксплуатационные затраты значительных средств. Нахождение близкого к оптимальному решения задачи распределения средств на сопровождение процесса перегрузки при поддержании защищенности перегружаемого оборудования на приемлемом уровне, близком к максимальному, — важнейшая задача по управлению риском.

При наличии запасов топлива на складе АЭС циклы перегрузки проводятся непрерывно 40-минутными интервалами для каждой ТВС. Для реакторов ВВЭР-1000 перегрузка всех ТВС производится в течении 720 ч, а для ВВЭР-440 — за 240 ч.

Тепловыделяющие сборки реактора типа ВВЭР имеют общее охлаждение, поэтому при перегрузке на реакторе ВВЭР отключены все сборки сразу и реактор простояивает. Пока не будут перегружены все ТВС, реактор типа ВВЭР остановлен. Что касается АЭС, снабженных реакторами типа РБМК (каждая ТВС имеет индивидуальное охлаждение), процесс перегрузки проходит в ночное время без остановки реактора.

Время простоя реактора типа ВВЭР — критический параметр, требующий минимизации.

Эффективность работы МП зависит от следующих факторов: необходимости проведения циклов перегрузки; наличия ремонтных работ на АЭС; проведения в текущий момент сборочных работ (сборка — разборка) при помощи подъемного крана; проведения в текущий момент планового осмотра реактора (производится 1 раз в несколько лет, например 1–2 раза в 3 года); наличия свежего ЯТ на складе АЭС; проведения в текущий момент контроля топлива на герметичность (на отсутствие трещин в ТВЭЛах).

Будем рассматривать математическую модель защищенности [1] применительно к машине перегрузочной, основанную на мониторинге критических параметров и управлении ими.

Эффективность работы моделируемой системы достигается за счет применения ремонтно-эксплуатационных стратегий, предполагающих обработку данных мониторинга. Например, текущий мониторинг перед каждым циклом перегрузки позволяет определять как наличие отказов, так и превышение определенными параметрами МП критических значений. Разрабатываемые стратегии должны обеспечивать своевременное принятие мер по безопасности процесса перегрузки и защищенности перегружаемого оборудования, приемлемых в том числе с финансовой точки зрения, что минимизирует внеплановые простои реактора.

Естественным образом возникает минимаксная задача стохастического программирования по определению оптимальной стратегии применения комплекса мер при заданном финансировании объекта и заданном уровне отказов (финансовых потерь). В реакторах типа ВВЭР возможны аварийные ситуации и поломки в ходе перегрузки, однако они не получают развития и не выходят в качестве чрезвычайных ситуаций за пределы АЭС (подобных случаев в ходе эксплуатации МП ранее не наблюдалось). Оценка рисков поражения внешней среды в настоящей работе не рассматривается.

Рассмотрим возможные сценарии (конечные состояния) одного цикла перегрузки. Сценарии обозначены заглавными буквами латинского алфавита:

S_0 — перегрузка прошла успешно;

S_1 — ложное срабатывание защитных блокировок;

S_2 – изгиб ТВС;
 S_3 – разгерметизация ТВС;
 S_4 – падение ТВС.

Ущербы оборудованию реактора обозначим соответственно: u_0, u_1, \dots, u_4

Средний ущерб за один цикл перегрузки составит

$$U = \sum_{i=0}^4 P_{S_i} u_i, \quad (1)$$

где $\{P_{S_i}\}$ — вероятности соответствующих конечных состояний, $i = \overline{0, 4}$.

Критическими компонентами оборудования МП, бесперебойное функционирование которых влияет на успешное завершение цикла перегрузки, являются (табл. 1): трос рабочей штанги (ТРШ); редуктор в приводе перемещения механизмов МП; подвижные механические части датчиков МП (контактные датчики, тензодатчики, ультразвуковые датчики, энкодеры).

Таблица 1

**Критические узлы МП
и типовые показатели их надежности**

Название узла	Показатель надежности	Наличина показателя
Трос рабочей штанги	Вероятность разрыва	$10^{-6}/\text{цикл}$
Датчики контактные	Износостойкость стаки	$10^{-7}-10^{-6} \text{ ч}^{-1}$
Тензодатчики, энкодеры	Износостойкость стаки	$10^{-7}-10^{-6} \text{ ч}^{-1}$

В ходе каждого цикла перегрузки указанные компоненты подвергаются износу в большей или меньшей степени.

Тепловыделяющая сборка представляет собой объединение ТВЭЛОв; последние в случае твердого замедлителя размещаются в специальных каналах сборки, по которым протекает теплоноситель. ТВЭЛ реактора ВВЭР-1000 представляет собой трубку, заполненную таблетками из двуокиси урана UO_2 и герметично уплотненную. Трубка ТВЭЛА изготавлена из рекристаллизованного циркония, легированного 1 % ниобия (сплав Н-1).

В ходе перегрузки ЯТ может возникнуть ряд нештатных ситуаций, приводящих к неблагоприятным исходам. Например, в случае падения

ТВС в ходе перегрузки ЯТ хрупкие стекловидные трубы ТВЭЛОв могут быть повреждены. При повреждении отдельных ТВЭЛОв вся сборка подлежит утилизации и замене (ремонтная практика для ТВС не применяется), что приводит к существенным издержкам для АЭС. Причем радиационную опасность представляют отработанные сборки ТВС в отличие от свежих сборок, топливо которых имеет только α - и β -активность. Перечень неблагоприятных исходов для ТВС приведен в табл. 2.

Таблица 2

Вероятности основных неблагоприятных исходов цикла перегрузки

Исход процесса перегрузки ТВС	Вероятность исхода
Надрыв	$2,45 \cdot 10^{-5}$
Изгиб	$1,01 \cdot 10^{-5}$
Сдвиг	$3,67 \cdot 10^{-5}$
Растяжение	$3,94 \cdot 10^{-7}$
Контактный удар	$5,07 \cdot 10^{-5}$
Скручивание	$2,64 \cdot 10^{-7}$

Опыт эксплуатации МП показывает, что нештатные ситуации, приводящие к аварийным событиям в большинстве случаев имеют следующие причины (перечислены в порядке значимости): износ и последующий обрыв троса ТРШ; отказы контактных датчиков, тензодатчиков и энкодеров; ошибки операторов МП.

Построим математическую модель защищенности применительно к МП. Под защищенностью в данном контексте будем понимать надежное безопасное состояние системы, обеспечиваемое выбором оптимальных стратегий по упреждению аварийных событий.

В [1] введено понятие *индекса защищенности* объекта и проведено обоснование необходимости его использования совместно с контролируемыми параметрами в процессе эксплуатации объекта.

Планирование процедуры мониторинга и защиты систем, подверженных деградации эксплуатационных параметров, предполагает расчет вероятности разрушения (отказа) системы



$$P_\varphi = P(g(x) \leq 0) = \int_{g(x) \leq 0} f_X(x) dx, \quad (2)$$

где $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ — вектор случайных состояний системы и внешних нагрузок; $g(X)$ — функция предельных состояний системы, которая определяет границу между безопасной областью $g(X) > 0$ и областью отказов $g(X) < 0$; $f_X(x)$ — совместная функция плотности распределения случайных величин X . Каждой модели разрушения (деградации) и каждому режиму работы соответствует своя функция $g_i(X)$.

Подход, применяемый в конструкционной теории надежности, позволяет в ряде случаев, используя функцию состояний, при помощи моделирования определить параметры надежности системы.

Рассмотрим простейший случай, когда в функцию предельных состояний входят две случайные величины: *несущая способность* $X_1 = R$ и *нагрузка* $X_2 = L$. Функция предельных состояний выражается следующим образом:

$$g(X) = R - L. \quad (3)$$

Введем случайную величину $M = R - L$, которая выражает *резерв несущей способности*. Поскольку R и L — случайные величины, M также является случайной величиной с математическим ожиданием μ_M и среднеквадратичным отклонением σ_M .

Будем считать R и L нормально распределенными случайными величинами с математическими ожиданиями $E(R) = \mu_R$ и $E(L) = \mu_L$ и соответственно среднеквадратичными отклонениями $\sigma(R) = \sigma_R$ и $\sigma(L) = \sigma_L$. Тогда величина M также распределена по нормальному закону, причем

$$\mu_M = \mu_R - \mu_L; \quad (3.1)$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}. \quad (3.2)$$

Вероятность отказа системы, т. е. вероятность превышения действующей нагрузкой несущей способности, выражается формулой

$$P_\varphi = P\{R \leq L\} = P\{M \leq 0\} = F_M(0).$$

Здесь $F_M(M)$ — функция распределения случайной величины M . Поскольку M распределена по нормальному закону, то

$$F_M(M) = \Phi\left(\frac{M - \mu_M}{\sigma_M}\right), \quad (4)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (5)$$

— функция распределения для нормального закона $N(0, 1)$.

Введем величину $\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M}$. Тогда вероятность разрушения выражается формулой

$$P_\varphi = \Phi\left(-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi(-\beta). \quad (6)$$

Величину β называют гауссовой мерой надежности, ее можно рассматривать как индекс защищенности системы, поскольку она представляет собой расстояние от наиболее вероятного положения системы $\Phi(x)|_{x=0}$ до пограничного состояния, характеризующегося отказами $\Phi(x)|_{x=-\beta}$. В одномерном случае это расстояние равно β . Чем больше индекс защищенности β , тем меньше вероятность отказа P_φ .

Аналогично определяется вероятность отказа для многомерного случая:

$$P_\varphi = P(g(x) \leq 0) = \\ = \int_{g(x) \leq 0} f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n. \quad (7)$$

В случае нескольких переменных β (скаляр) представляет собой расстояние от начала координат до поверхности уровня с равновероятными ($P = P_\varphi$) состояниями системы, соответствующими β .

Для реальных объектов, эксплуатирующихся в течение длительного периода времени, внешние нагрузки и несущая способность системы меняются во времени, причем индекс защищенности $\beta = \beta(t)$, математические ожидания $\mu_R(t)$, $\mu_L(t)$ и среднеквадратичные отклонения $\sigma_R(t)$ и $\sigma_L(t)$ являются функциями времени.

Резерв несущей способности $M(t) = R(t) - L(t)$ также случайная величина, зависящая от времени, как и вероятность отказа $P_\varphi(t)$:

$$P_\varphi(t) = P\{M(t) \leq 0\} = P\{g(X(t)) \leq 0\}, \quad (8)$$

где $g(X(t)) = M(t)$ — функция ограничения (в данном случае зависящий от времени резерв

несущей способности). Поверхность $g(x) = 0$ носит название поверхности предельных состояний. Вероятность отказа системы выражается формулой

$$P_\varphi(t) = \int_{g(X(t)) \leq 0} f_{X(t)}(x(t)) dx(t). \quad (9)$$

Поскольку действующие нагрузки имеют тенденцию к увеличению, а несущая способность снижается, важной задачей является определение критических значений параметров системы, при которых уровень разрушений будет приемлемым.

Рассмотрим задачу минимизации потенциального ущерба от аварий на критически важных объектах (КВО). При ее решении необходимо учитывать различные виды расходов, например затраты на проектирование, эксплуатацию, инспектирование, непрерывный мониторинг и т. д.

Минимизацию будем проводить на множестве эксплуатационных стратегий $\{z_i\}$, приводящих объект к конечным состояниям S_0, \dots, S_N . Под общими затратами Z на реализацию стратегии z_i следует понимать сумму затрат $C(z_i)$ на реализацию стратегии z_i и среднюю величину ожидаемого ущерба $E[U(z_i)]$:

$$Z(z_i) = C(z_i) + E[U(z_i)]. \quad (10)$$

Выбор оптимальной стратегии эксплуатации критически важных объектов минимизирует данное выражение для суммарных затрат:

$$\min_{z_i} Z(z_i) = \min_{z_i} \{C(z_i) + E[U(z_i)]\}. \quad (11)$$

При минимизации необходимо наложить ограничения, например на вероятность аварии $P_\varphi(z_i)$ в исследуемый период времени при условии, что $P'_\varphi \leq P_\varphi(z_i) \leq P''_\varphi$. Кроме того, возможны и другие ограничения, например на величину допустимого ущерба, периодичность проводимых инспекций и др.

Если конечные состояния S_0, \dots, S_N реализуются с вероятностями $P_{S_0}(z_i), \dots, P_{S_N}(z_i)$ и сопровождаются ущербами U_{S_0}, \dots, U_{S_N} , то величина ожидаемого ущерба может быть вычислена как

$$E[U(z_i)] = \sum_{j=0}^N P_{S_j}(z_i) U_{S_j}, \quad (12)$$

а выражение для суммарных затрат $Z(z_i)$ примет вид

$$Z(z_i) = C(z_i) + \sum_{j=0}^N P_{S_j}(z_i) U_{S_j}. \quad (13)$$

При минимизации суммарных затрат приходится искать баланс между противоречащими друг другу по сути целями: 1) снижением эксплуатационных издержек; 2) снижением ожидаемых ущербов и, соответственно, повышением защищенности системы.

Если действующие нагрузки и параметры несущей способности системы распределены по закону с известными математическими ожиданиями и дисперсиями, то в качестве определяющего параметра при выборе оптимальной стратегии эксплуатации объекта можно использовать индекс защищенности. Построенная теория позволяет применять индекс защищенности не только к механическим системам.

Действительно, рост вероятности разрушения соответствует уменьшению индекса защищенности $\beta(t) = \frac{\mu_M(t)}{\sigma_M(t)}$, поскольку, например, для нормального закона распределения $P_\varphi = \Phi(-\beta)$.

Вследствие деградации свойств и накопления повреждений в процессе эксплуатации объекта индекс защищенности естественным образом снижается и может достичь предельно допустимого (критического) значения β_{cr} , при этом вероятность разрушения растет и достигает критического значения P_{cr} . Поэтому контроль вероятности разрушения эквивалентен контролю над индексом защищенности, и наоборот. В случае многомерного нормального распределения для величин X_1, X_2, \dots, X_n необходимо перейти к стандартным величинам $Y_i = (X_i - \mu_{X_i}) / \sigma_{X_i}$ и осуществлять контроль над параметрами Y_1, \dots, Y_n так, чтобы они находились за пределами n -мерной сферы радиуса β_{cr} :

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2} \geq \beta_{cr}. \quad (14)$$

В новых переменных $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ условие ограничения $g(x) \leq 0$ примет вид

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = g'(y_1, y_2, \dots, y_n) = g'(y) \leq 0. \quad (15)$$



Если положить

$$\beta_{cr} = \min_{u \in \{g'(y)=0\}} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}, \quad (16)$$

то выполнение условия (14) влечет за собой выполнение условия (15).

Итак, защитные мероприятия должны быть направлены:

на замедление скорости снижения β , что достигается с помощью мер технического обслуживания, например путем введения дополнительных «защит»;

на повышение β путем капитального ремонта/замены поврежденных элементов.

В соответствии с изложенной теорией авторами была разработана имитационная модель процесса перегрузки ЯТ. Написанная авторами программа Protectability на языке C++ позволяет «виртуально» проводить процесс перегрузки ЯТ. Программа вычисляет затратную составляющую U полного процесса перегрузки, много-кратно его повторяя, проводя испытания с различными входными данными. Параметры состояния текущего шага (цикла) перегрузки либо зависят от предыдущего шага перегрузки, либо основаны на случайных величинах, генерируемых методом Монте-Карло.

В качестве контролируемого параметра модели выбрана вероятность износа троса (ТРШ), поскольку данный параметр среди трех ранее рассмотренных наиболее важен (см. выше). Программа реализует процедуру моделирования, где одним из входных параметров является модель износа (разрушения), реализованная в виде класса C++, причем возможна смена модели износа.

Вычисления проведены для двух моделей износа ТРШ, наиболее адекватно отражающих поведение реальных образцов металлического троса, который применяется в МП на ЗАО «Диаконт». Следует отметить, что ЗАО «Диаконт» использует в МП только те образцы тросов, которые прошли приработку, поэтому в построенных моделях износа повышенное число отказов на начальном этапе эксплуатации троса не наблюдается. По аналогичным соображениям не используются и тросы «сильно» изношенные, они заменяются заблаговременно. Программа вычисляет затратную составляющую U полного процесса перегрузки ЯТ, состоящего из $T_e = 1000$

циклов перегрузки (для определенности), которую можно выразить формулой

$$U = \sum_{t=0}^{T_e-1} [A(t, P(t))u_0 + B(t, P(t))u_1], \quad (17)$$

где u_0 — расходы на замену одного ТРШ; u_1 — расходы на замену одной ТВС.

Здесь целочисленные коэффициенты A и B «включаются» или «выключаются» в зависимости от результатов перегрузки на каждом шаге модельного времени, результатов инспектирования троса и наличия аварийного состояния после перегрузки в момент времени t . Модельное время предполагается дискретным, меняющимся от 0 до $T_e - 1$.

Испытания для вычисления средних затрат U проводятся многократно (50 000 испытаний), что позволяет судить о доверительном интервале U и об относительных погрешностях. Аналогично с помощью программы вычисляются и величины U_0 и U_1 — средние затраты соответственно на замену тросов и на замену ТВС за время T_e :

$$U_0 = \sum_{t=0}^{T_e-1} A(t, P(t))u_0, \quad U_1 = \sum_{t=0}^{T_e-1} B(t, P(t))u_1. \quad (18)$$

На рис. 1 приведен алгоритм работы программы Protectability.

В процедуре моделирования процесса перегрузки ЯТ обрыв ТРШ приводит к падению (и потере) ТВС. Среди входных параметров $u_0 = 300\ 000\ 000$ и $u_1 = 300\ 000\ 000$ — приблизительные стоимости в рублях ТРШ и ТВС на основе реальных данных, что дает возможность пользователю программы оценивать затраты в рублевом эквиваленте.

Вероятность обрыва ТРШ задается моделью деградации троса (каждая модель — на отдельном классе C++), которая реализует вычисление вероятности $P(t)$ обрыва троса в данный момент времени. В обеих моделях вероятность обрыва троса является детерминированной величиной, если ее вычислять начиная с момента замены троса. Но поскольку трос подлежит замене при случайном обрыве, ветвление в случае замены придает алгоритму «эвристику», свойственную моделям систем массового обслуживания.

Рассмотрим детально модели износа ТРШ, которые применялись в расчетах. Основные модели износа, применяемые в современной теории

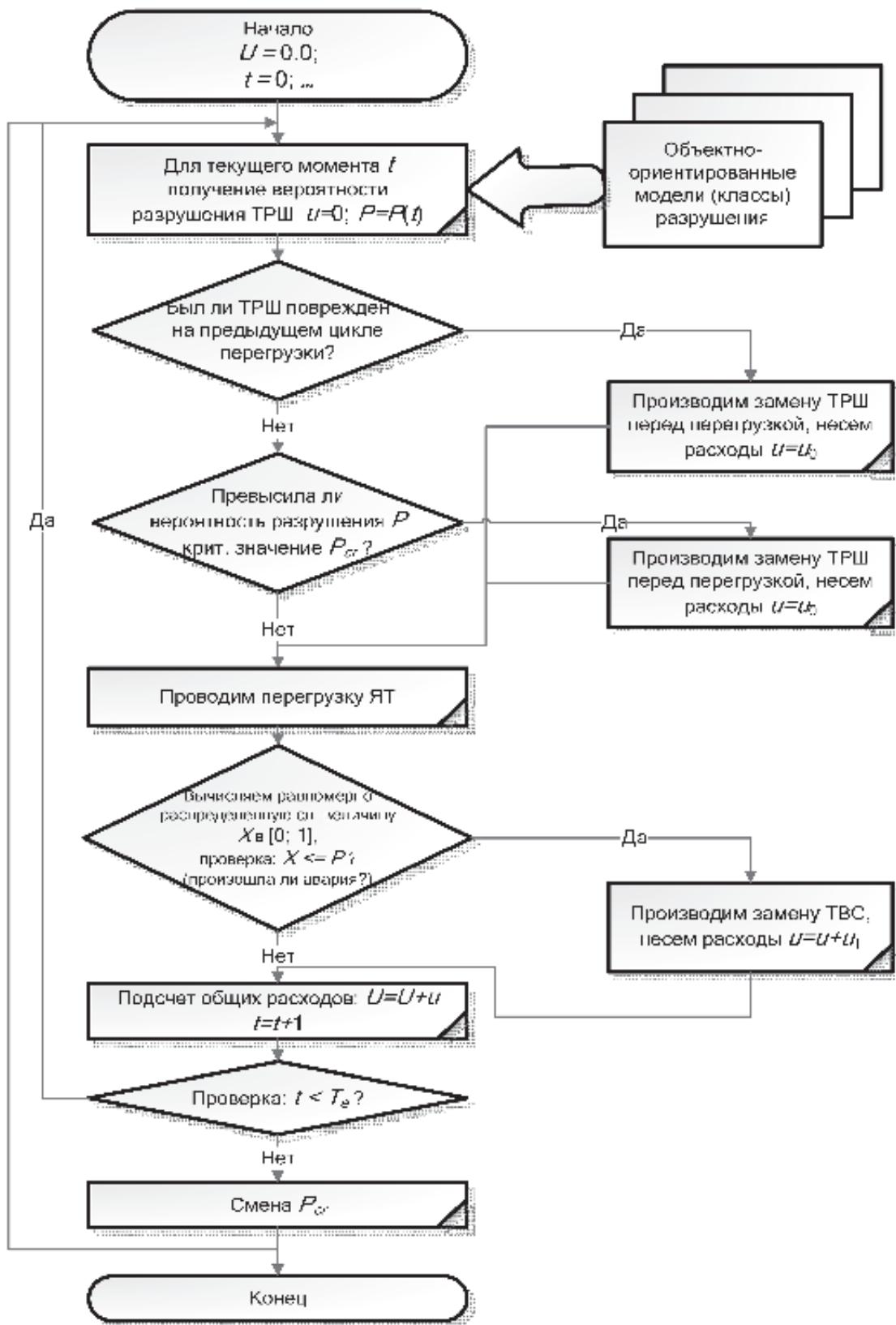


Рис. 1. Алгоритм, иллюстрирующий имитационную модель перегрузки ЯТ



надежности приведены в [2]. Запрограммированные модели должны обеспечивать вычисление вероятности износа $P(t)$. Программная реализация с применением классов C++ позволяет: не переписывая программного кода менять модель износа; оптимизировать вычисления значений $P(t)$, предварительно сохранив их в массиве, поскольку вычисление $P(t)$ производится многократно.

1. Модель износа, основанная на экспоненциальном росте вероятности разрушения (экспоненциальная модель разрушения):

$$P(t) = \max\left\{P_0 e^{k(t-t_i)}, 1\right\}, \quad (19)$$

где P_0 — значение вероятности разрушения в начальный момент времени t_0 ; t_i — момент времени, в который произошла последняя замена ТРШ; k — коэффициент износа.

Исходные данные: $P_0 = 10^{-6}$, $k = 1$.

2. Модель износа ТРШ, основанная на распределении Гаусса: применяя теорию надежности к тросу, положив $P_0 = 10^{-6}$, подберем β так,

что $\Phi(-\beta) = P_0$; $-\beta = \frac{\mu_L - \mu_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}}$. Это достигается

при $\beta = 4,971569848$.

Представим себе трос, состоящий из большого числа волокон, нагрузка на которые распределяется при их разрыве как величина обратно пропорциональная их оставшемуся количеству. Для выражения $P(t)$ получим следующие рекуррентные соотношения:

$$P(t_k) = P_k;$$

$$K_0 = 1; \quad P_0 = \Phi\left(\frac{\mu_L K_0 - \mu_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + (\sigma_L K_0)^2}}\right); \quad (20)$$

$$K_k = K_{k-1} / (1 - P_{k-1}); \quad P_k = \Phi\left(\frac{\mu_L K_k - \mu_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + (\sigma_L K_k)^2}}\right).$$

Примечание. Для расчетов в программе использовалась следующая аппроксимация функции $\Phi(x)$ (для уточнения формулы см. [3]):

$$\Phi(x) = 0,5 + \varphi(x) \text{ при } x > 0; \quad (21)$$

$$\Phi(x) = 0,5 - \varphi(x) \text{ при } x < 0,$$

$$\text{где } \varphi(x) = 0,5 \left[1 - e^{-0,37x^2 - 0,8|x|} \right].$$

Чтобы иметь возможность сравнить две модели, подберем коэффициент запаса прочности $K = \mu_R / \mu_L$ при найденном выше β таким образом, чтобы трос вышел из строя приблизительно так же быстро, как в модели 1, т. е. за 13 шагов модельного времени $P(t) > 0,5$. Это достигается в нашем примере при следующих исходных данных: $K = 1,0002$, $\mu_L = 700$, $\mu_R = K\mu_L$, $\sigma_L = 0$, $\sigma_R = (K-1)/\beta\mu_L$.

На рис. 2 приведены графики вероятности разрушения $P_{\text{разр}} = P(t)$.

Результаты проведенной работы следующие:

Построены две модели разрушения (деградации) ТРШ — экспоненциальная модель износа и модель износа на основе распределения Гаусса.

С помощью программы Protectability для обеих моделей разрушения троса методом имитационного моделирования вычислены средние суммарные затраты на полный процесс перегрузки ЯТ с учетом поддержания параметра защищенности $P = P(t) \leq P_{cr}$ на заданном уровне (в данном случае это P_{cr} — критический уровень вероятности разрушения ТРШ). При этом индекс защищенности $\beta \geq \beta_{cr}(P_{cr})$.

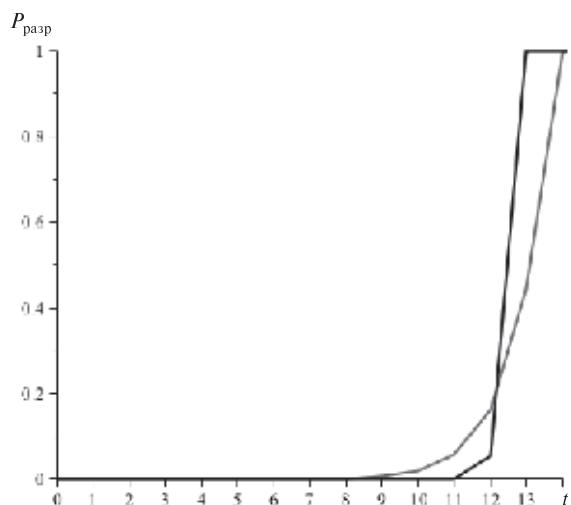


Рис. 2. Зависимость $P_{\text{разр}}$ от времени t :

— экспоненциальная модель разрушения (износа);
— модель износа на основе распределения Гаусса

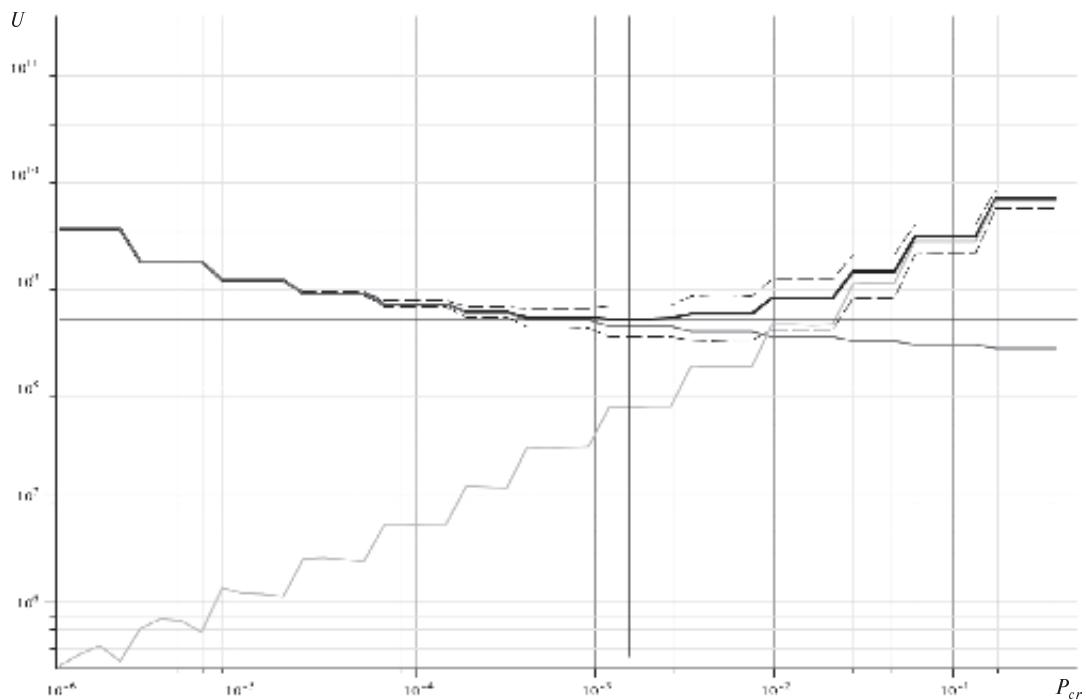


Рис. 3. Зависимость ущерба U от критической вероятности P_{cr}
(экспоненциальная модель износа)

— $U = U_0 + U_1$ — общий ущерб; — — доверительный интервал для U : $[U - s_U; U + s_U]$;
— U_0 — общие расходы на закупку троса; — — U_1 — общие расходы на закупку ТВС

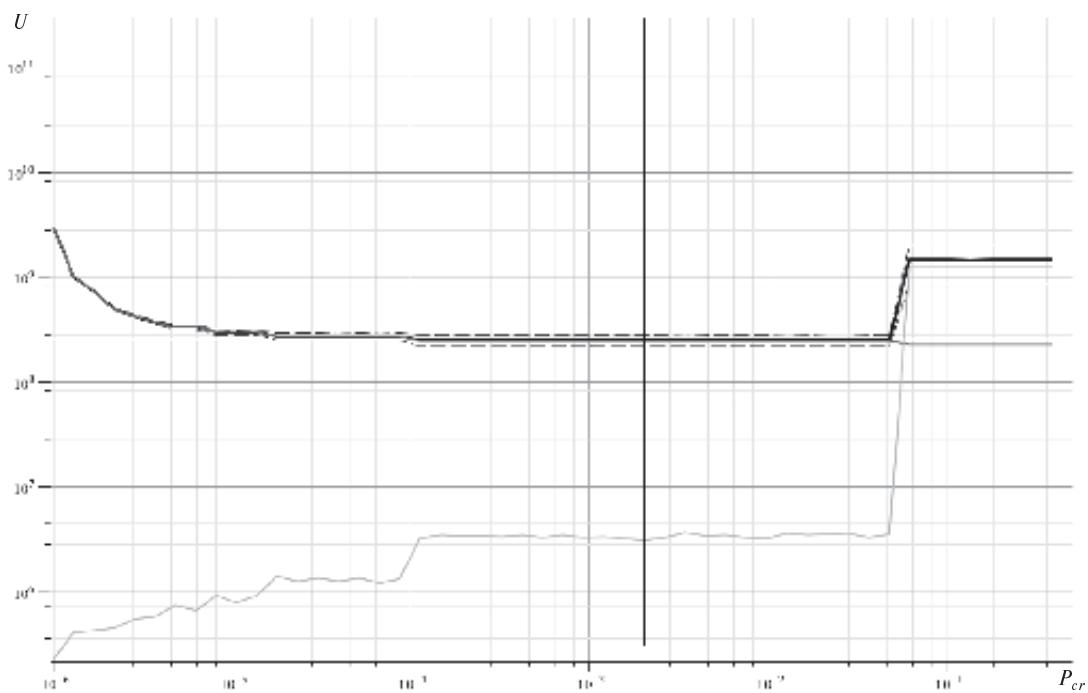


Рис. 4. Зависимость ущерба U от критической вероятности P_{cr}
(модель износа на основе распределения Гаусса)

— $U = U_0 + U_1$ — общий ущерб; — — доверительный интервал для U : $[U - s_U; U + s_U]$;
— U_0 — общие расходы на закупку троса; — — U_1 — общие расходы на закупку ТВС



Для обеих моделей разрушения троса проведена минимизация средних значений суммарных затрат U на процесс перегрузки ЯТ при различных значениях P_{cr} . Как выяснилось, данная функция имеет выраженный минимум, достижение которого на практике возможно, если величины u_0 и u_1 (стоимости ТРШ и ТВС) имеют значения, близкие к реальным. При определении средних значений U , U_0 и U_1 вычисления проводились многократно (50 000 испытаний), что позволило судить о доверительном интервале U и об относительных погрешностях. Графики зависимости ущербов от критической вероятности в логарифмическом масштабе приведены на рис. 3 и 4, где наглядно видно, что благодаря минимизации затраты U могут быть существенно снижены.

При проведении 50 000 испытаний относительные погрешности $\pm\sigma_U / U$ по модулю не превышают 0,50 для 1-й модели и 0,41 для 2-й модели на всем промежутке значений P_{cr} . При достижении средних величин U своих минимальных значений в точках $P_{cr} = 0,0015539$ для 1-й модели и $P_{cr} = 0,00202024$ для 2-й погрешности находятся соответственно на уровне 0,32 и 0,12.

Аналогичный подход и построенная математическая модель применимы к произвольным параметрам любых критически важных объектов (КВО), для которых имеют смысл финансовые потери и индекс защищенности, а оптимизация дает существенное улучшение параметров. Для получения адекватных результатов достаточными должны быть вычислительная мощность ЭВМ и точность операций с плавающей запятой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махутов, Н.А. Обеспечение защищенности и минимизация общих эксплуатационных затрат и ущербов в течение жизненного цикла критически важных объектов путем выбора оптимальных стратегий проведения технических инспекций и ремонта [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.П. Петров, В.И. Куксова // Проблемы анализа риска; Том X. — 2010. Т. 5. — № 3.— С. 34–67.
2. Яковлев, В.В. Прикладные аспекты теории надежности технических систем [Текст]: учебное пособие / Яковлев В.В. // СПб., 2007.
3. Зубков, А.М. Сборник задач по теории вероятностей [Текст] / А.М. Зубков, Б.А. Севастьянов, В.П. Чистяков // М.: Наука, 1989.
4. Гуменюк, В.И. Основы комплексной защиты системы военной связи от средств поражения [Текст] / В.И. Гуменюк / ВАС.— СПб., 2002.— 306 с.

УДК 614.84

В.А. Белянин, А.Л. Розов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭКОНОМИКИ И СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРЫ В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ

Наша страна сейчас находится на этапе реформирования (иногда слепого), на переходе к рыночной экономике. Прежняя система пожарной безопасности, действовавшая в СССР, частично (а иногда и в основном) разрушена. Новая система далека от создания.

В чем между этими системами принципиальное различие?

В СССР за систему пожарной безопасности отвечало прежде всего государство. В настоящее время эффективно организованная система по-

жарной безопасности должна учитывать условия рыночной экономики (естественно, переходного периода). Последнее до сих пор плохо удается. На это указывает статистика: в России ежегодно погибает от ОФП более 100 человек в расчете на 1 млн населения, а в развитых странах мира этот показатель составляет от 7 до 15 человек, т. е. мы отстаем на порядок.

Рассмотрим, насколько сложно формируется в нашей стране новая система пожарной безопасности.

Анализируя всевозможные источники зажигания, мы видим, что появление источника зажигания (инициирование взрыва) на объектах экономики и социальной сферы — вероятностная величина, зависящая главным образом от человеческого фактора. Учитывая, что человеческий фактор недостаточно контролируем, предотвратить загорание на объекте экономики и социальной сферы достаточно сложно.

Вместе с тем возникновение загорания на объекте экономики и социальной сферы не основная причина нанесения социального и материального ущерба. При условии, что на объекте система пожарной безопасности функционирует в требуемом режиме, загорание будет ликвидировано, прежде чем перерастет в пожар и нанесет материальный и социальный ущерб.

Следовательно, важно создать условия, препятствующие перерастанию (переходу) загорания в пожар, ограничить распространение пожара (загорания) и его опасных факторов и создать условия для успешного тушения. При проведении инспекций органы государственного пожарного надзора проверяют соблюдение тех противопожарных мероприятий, которые препятствуют распространению пожара (загорания) и его опасных факторов, обеспечивают безопасную эвакуацию людей, а также создают благоприятные условия для его тушения.

В ходе анализа нормативных правовых актов, регламентирующих порядок технического обслуживания средств противопожарной защиты и периоды организационно-обучающих мероприятий, установлено, что их необходимо проводить, как правило, ежегодно. Это позволяет обеспечивать необходимый уровень работоспособности систем противопожарной защиты.

Соответственно и плановые проверки органам государственного пожарного надзора необходимо проводить ежегодно.

Вместе с тем с 1 мая 2009 года вступил в силу Федеральный закон от 26 декабря 2008 года № 294-ФЗ «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» (принят Государственной Думой 19 декабря 2008 года, одобрен Советом Федерации 22 декабря 2008 года), который внес жесткие ограничения при организации проведения проверок объектов экономики и социальной сферы.

Плановые проверки проводятся не чаще одного раза в три года.

Плановые проверки проводятся на основании ежегодных планов, разрабатываемых органами государственного контроля (надзора), органами муниципального контроля в соответствии с их полномочиями.

Основание для включения плановой проверки в ежегодный план их проведения — истечение трех лет со дня:

государственной регистрации юридического лица, индивидуального предпринимателя;

окончания последней плановой проверки юридического лица, индивидуального предпринимателя;

начала осуществления юридическим лицом, индивидуальным предпринимателем предпринимательской деятельности в соответствии с уведомлением, представленным в уполномоченный Правительством Российской Федерации в соответствующей сфере федеральный орган исполнительной власти, о начале осуществления отдельных видов предпринимательской деятельности в случае выполнения работ или предоставления услуг, требующих указанного уведомления.

В отношении юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, осуществляющих виды деятельности в сфере здравоохранения, образования, в социальной сфере, плановые проверки могут проводиться два и более раза в три года. Перечень таких видов деятельности и периодичность их плановых проверок устанавливаются Правительством Российской Федерации.

В соответствии со ст. 9 Федерального закона «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» принято Постановление Правительства РФ от 23 ноября 2009 года № 944 «Об утверждении перечня видов деятельности в сфере здравоохранения, сфере образования и социальной сфере, осуществляемых юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, в отношении которых плановые проверки проводятся с установленной периодичностью». Оно устанавливает следующее:

1) на объектах амбулаторно-поликлинической медицинской помощи — проверки не чаще 1 раза в 2 года;



2) на объектах стационарной и санаторно-курортной медицинской помощи — проверки не чаще 1 раза в 2 года;

3) на объектах дошкольного и начального общего образования — проверки не чаще 1 раза в год;

4) на объектах основного общего и среднего (полного) общего образования — проверки не чаще 1 раза в год;

5) в детских лагерях на время каникул — проверки 1 раз перед началом каникул.

6) на объектах предоставления социальных услуг с обеспечением проживания — проверки не чаще 1 раза в год.

22 марта 2010 года приказом МЧС РФ от 22.03.2010 № 122 внесены изменения в Приказ МЧС РФ от 1 октября 2007 года № 517 «Об утверждении Административного регламента Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий по исполнению государственной функции по надзору за выполнением федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления, организациями, а также должностными лицами и гражданами установленных требований пожарной безопасности», в том числе в отношении планирования плановых проверок.

Данным приказом установлено, что органы ГПН ГУ МЧС России по субъектам Российской Федерации определяют периодичность проведения проверок на объектах надзора, если это не установлено законодательством Российской Федерации. Планирование проверок осуществляется в порядке и сроки, установленные законодательством Российской Федерации, на основе анализа обстановки с пожарами, противопожарного состояния населенных пунктов, объектов надзора с учетом решений вышестоящих государственных инспекторов по пожарному надзору, сезонных и местных условий, с учетом сроков исполнения ранее выданных предписаний об устранении выявленных нарушений обязательных требований пожарной безопасности.

Вместе с тем в настоящий момент не установлены конкретные периоды проведения плановых проверок объектов экономики и социальной сферы. Периодичность проведения плановых проверок на объектах экономики и социальной сферы определяется самостоятельно управлени-

ями ГПН субъектов Российской Федерации без научно обоснованных методик. Критерии для определения периодов этих проверок отсутствуют. Не учитываются фактические возможности органов ГПН.

Соответственно возникает ряд проблем, связанных с обеспечением пожарной безопасности на объектах экономики и социальной сферы; в их числе:

законные ограничения частоты проведения плановых проверок объектов экономики и социальной сферы;

отсутствие критериев для определения конкретных периодов плановых проверок различных объектов экономики и социальной сферы;

отсутствует методика определения объектов, которые являются приоритетными при организации и проведений плановых проверок;

ограниченные ресурсы органов государственного пожарного надзора. В настоящий момент на одного сотрудника государственного пожарного надзора, непосредственно осуществляющего проверки объектов защиты, приходится в среднем 300–400 объектов.

В целях решения этих проблем и определения приоритетных объектов для проведения проверок выполнена обработка статистических данных о частоте возникновения пожаров (рис. 1, 2).

По результатам обработки статистических и справочных данных о частоте возникновения пожаров (загораний) установлено, что эта величина зависит от ряда факторов: в производственных зданиях — от вида функционального назначения и площади здания; в общественных зданиях — от вида функционального назначения и количества людей.

Расчетные данные, полученные с применением стандартной методики расчета пожарного риска, показывают, что при частоте возникновения пожаров (загораний) для зданий более $7,7 \cdot 10^{-3}$ год $^{-1}$ величина индивидуального пожарного риска превышает нормативное значение (10^{-6} год $^{-1}$), что недопустимо.

Определение предельно допустимой частоты возникновения пожара в здании в течение года — $Q_{\text{п}}$:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{н}} / ((1 - R_{\text{ап}}) P_{\text{пп}} (1 - P_{\text{з}}) (1 - P_{\text{п.з}})),$$

где $Q_{\text{н}}$ — нормативное значение индивидуального пожарного риска (10^{-6} год $^{-1}$); $R_{\text{ап}}$ — вероятность эффективного (0,9) срабатывания установ-

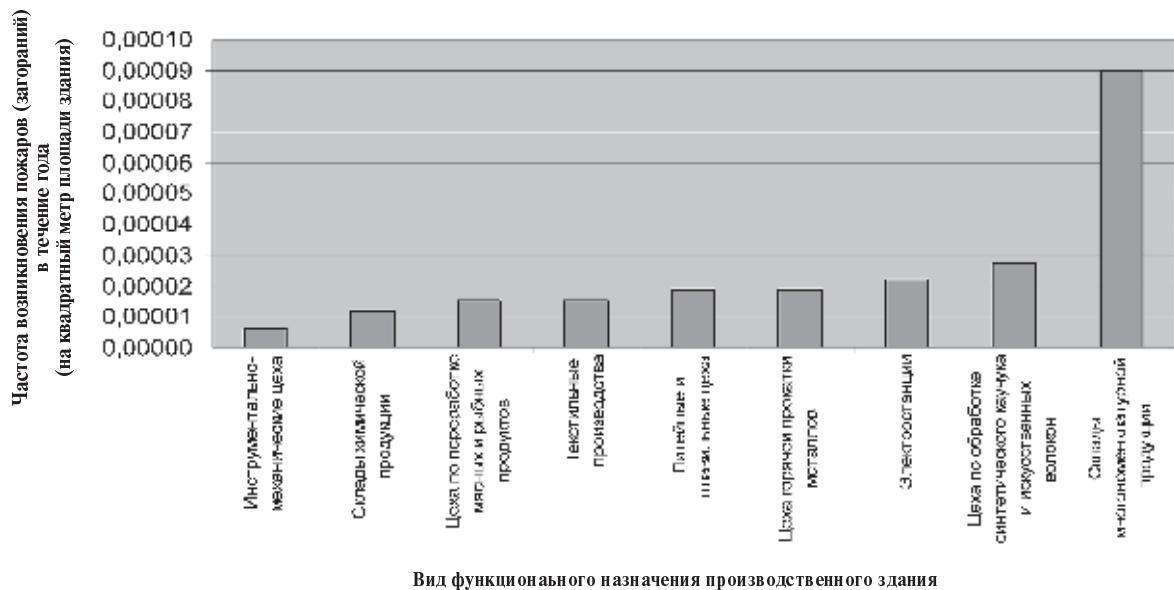


Рис. 1. Градация производственных зданий по значениям частоты пожаров (загораний)

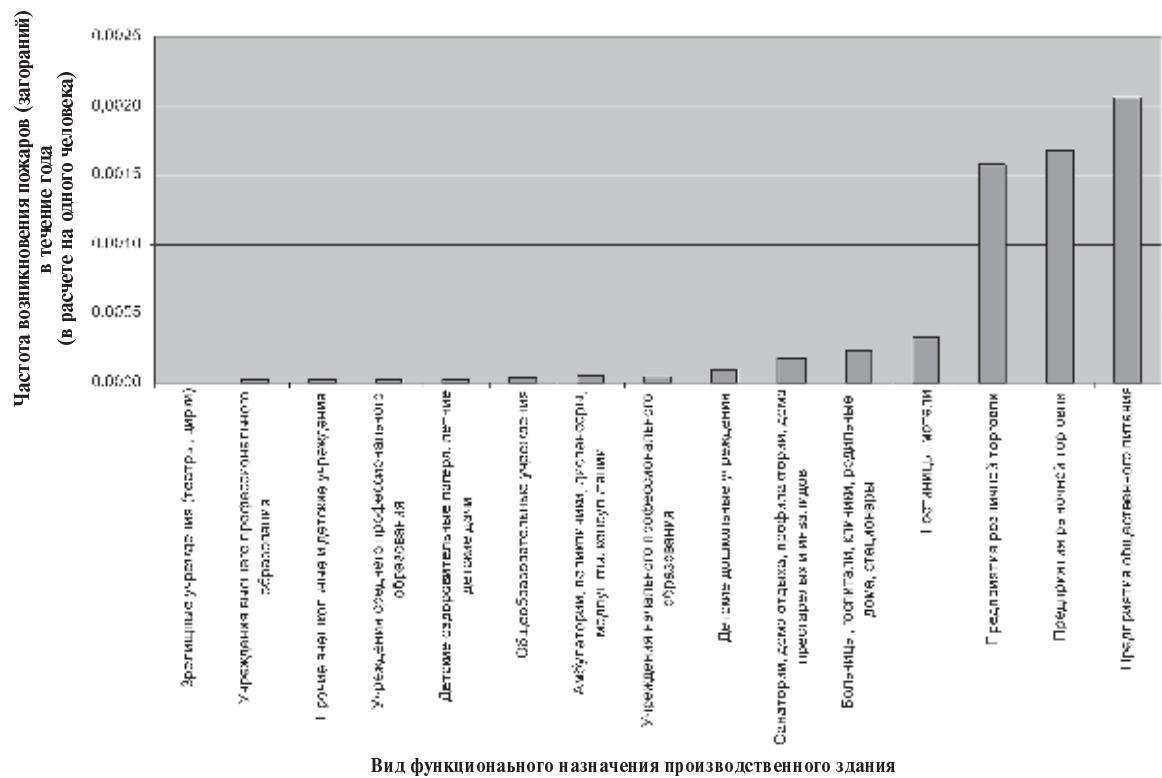


Рис. 2. Градация общественных зданий по значениям частоты пожаров (загораний)



вок автоматического пожаротушения при отсутствии в здании систем автоматического пожаротушения принимается равной нулю; $P_{\text{пр}}$ — вероятность присутствия людей в здании (1,0); P_s — вероятность эвакуации людей (0,999); $P_{\text{пз}}$ — вероятность эффективной работы системы противопожарной защиты, направленной на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре.

$$P_{\text{пз}} = 1 - (1 - R_{\text{обн}} R_{\text{СОУЭ}})(1 - R_{\text{обн}} R_{\text{ПДЗ}}),$$

где $R_{\text{обн}}$ — вероятность эффективного срабатывания системы пожарной сигнализации (0,8); $R_{\text{СОУЭ}}$ — условная вероятность эффективного срабатывания системы оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией людей в случае эффективного срабатывания системы пожарной сигнализации (0,8); $R_{\text{ПДЗ}}$ — условная вероятность эффективного срабатывания системы противодымной защиты в случае эффективного срабатывания системы пожарной сигнализации (0,8).

$$P_{\text{пз}} = 1 - (1 - 0,8 \cdot 0,8)(1 - 0,8 \cdot 0,8) = 0,8704;$$

$$Q_n = 1 \cdot 10^{-6} / [(1 - 0)1(1 - 0,999)(1 - 0,8704)] = \\ = 7,7 \cdot 10^{-3}, \text{год}^{-1}.$$

В связи с этим и исходя из значений факторов, влияющих на частоту возникновения пожаров (загораний), здания возможно разделить на классы по опасности возникновения пожаров (загораний).

I класс опасности возникновения пожаров (загораний) (высокий) — частота возникновения пожаров (загораний) от $7,7 \cdot 10^{-3}$ (год $^{-1}$) и выше. К нему относятся:

склады многономенклатурной продукции (площадь здания более 100 м 2);

электростанции, склады химической продукции, литейные и плавильные цеха, цеха по переработке мясных и рыбных продуктов, цеха горячей прокатки металлов, текстильные производства, цеха по обработке синтетического каучука и искусственных волокон (площадь здания более 500 м 2);

инструментально-механические цеха (площадь здания более 1000 м 2);

предприятия розничной торговли (универмаги, промтоварные магазины, универсамы, продовольственные магазины, магазины смешанных товаров, аптеки, аптечные ларьки, прочие здания торговли), предприятия рыночной торговли (крытые, оптовые рынки со зданиями стационарной постройки), торговые павильоны, киоски, ларьки, палатки, контейнеры), предприятия общественного питания, детские дошкольные учреждения (детские сады, ясли, дома ребенка), больницы, госпитали, клиники, родильные дома, психоневрологические интернаты и другие стационары, санатории, дома отдыха, профилактории, дома престарелых и инвалидов (количество человек — более 50);

гостиницы, мотели, общеобразовательные учреждения (школы, школы-интернаты, детские дома, лицеи, гимназии, колледжи, учреждения начального профессионального образования (профессиональные технические училища), амбулатории, поликлиники, диспансеры, медпункты, консультации, детские оздоровительные лагеря, летние детские дачи (количество человек более 100);

учреждения среднего профессионального образования (средние специальные учебные заведения), учреждения высшего профессионального образования (высшие учебные заведения), прочие внешкольные и детские учреждения (количество человек более 250);

зрелищные учреждения — театры, цирки (количество человек более 2500).
II класс опасности возникновения пожаров (загораний) (низкий) — частота возникновения пожаров (загораний) до $7,7 \cdot 10^{-3}$ (год $^{-1}$) — включает:

склады многономенклатурной продукции (площадь здания менее 100 м 2);

электростанции, склады химической продукции, литейные и плавильные цеха, цеха по переработке мясных и рыбных продуктов, цеха горячей прокатки металлов, текстильные производства, цеха по обработке синтетического каучука и искусственных волокон (площадь здания менее 500 м 2);

инструментально-механические цеха (площадь здания менее 1000 м 2).

предприятия розничной торговли (универмаги, промтоварные магазины, универсамы, продовольственные магазины, магазины смешанных товаров, аптеки, аптечные ларьки, прочие здания торговли), предприятия рыночной торговли (крытые, оптовые рынки со зданиями стационарной постройки), торговые павильоны, киоски, ларьки, палатки, контейнеры), предприятия общественного питания, детские дошкольные учреждения (детские сады, ясли, дома ребенка), больницы, госпитали, клиники, ро-

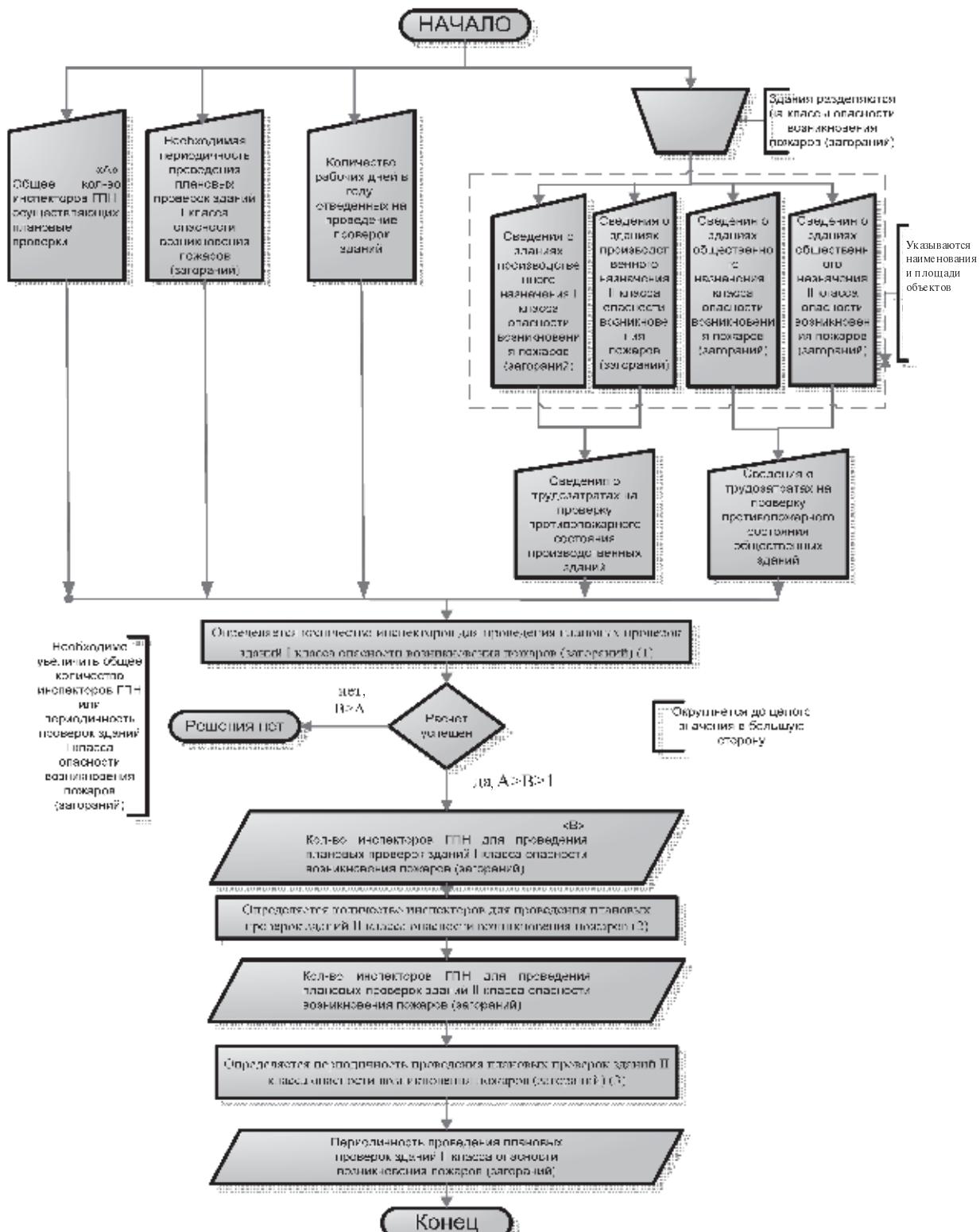


Рис. 3. Алгоритм определения периодичности проведения плановых проверок за соблюдением требований пожарной безопасности на объектах экономики и социальной сферы



дильные дома, психоневрологические интернаты и другие стационары, санатории, дома отдыха, профилактории, дома престарелых и инвалидов (количество человек менее 50);

гостиницы, мотели, общеобразовательные учреждения (школы, школы-интернаты, детские дома, лицеи, гимназии, колледжи, учреждения начального профессионального образования (профессиональные технические училища), амбулатории, поликлиники, диспансеры, медпункты, консультации, детские оздоровительные лагеря, летние детские дачи (количество человек менее 100);

учреждения среднего профессионального образования (средние специальные учебные заведения), учреждения высшего профессионального образования (высшие учебные заведения),

прочие внешкольные и детские учреждения (количество человек менее 250);

зрелищные учреждения (театры, цирки) (количество человек менее 2500).

С учетом результатов исследований разработан алгоритм определения периодичности проведения плановых проверок за соблюдением требований пожарной безопасности на объектах экономики и социальной сферы (рис 3).

Разработанная методика определения периодичности плановых проверок соблюдения требований пожарной безопасности на объектах экономики и социальной сферы, которая использует сведения о частоте возникновения пожаров (загораний) и о трудозатратах на проведение проверок, позволяет оптимизировать эту важную область деятельности.

УДК 622.692

Т.Ю. Иванова

ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Все известные методики определения вероятного объема вытекшей нефти из аварийного нефтепровода имеют одно общее — они разделяют процесс истечения нефти на три этапа:

истечение при полном действующем давлении от момента разгерметизации трубопровода до момента отключения перекачивающих станций;

истечение от момента отключения насосов перекачивающих станций до момента закрытия задвижек;

свободное истечение от момента закрытия задвижек до полного истечения нефти из аварийного участка трубопровода либо до момента остановки истечения аварийной бригадой.

Наиболее общим подходом среди рассмотренных отличается методика оценки степени риска эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов ОАО «АК Транснефтепродукт» рекомендует рассматривать максимально возможные объемы разлившегося нефтепродукта при авариях на этих объектах и рассчитывать вероятные объемы выхода нефтепродукта исход-

я из двух вариантов прогнозирования аварийных разливов нефти (APN):

потенциально возможного максимального объема аварийно разлившегося нефтепродукта;

ожидаемой (наиболее вероятной) массы утечек нефтепродукта, учитывающей достигнутый уровень эксплуатационной надежности и опыт ликвидации аварийных разливов.

Расчет потенциально возможного максимума аварийного разлива нефти на трубопроводах

Порядок оценки потенциально возможного максимума аварийного разлива нефти или нефтепродуктов на нефтепродуктопроводах определен постановлениями Правительства РФ № 613 от 21.08.2000 [1] и № 240 [2]:

1. При прорыве (гильотинный разрыв) нефтепродуктопроводов объем V_{max} истечения определяется как сумма 25 % максимального объема V_1 прокачки в течение 6 ч и объема V_2 нефтепродукта между задвижками, ограничивающими аварийный участок трубопровода:

$$V_{\max} = V_1 + V_2, \quad (1)$$

где объем V_1 прокачки нефтепродукта в течение 6 часов определяется выражением

$$V_1 = 0,25Q_{\text{пп}} \cdot 6 = 1,5Q_{\text{пп}}, \quad (2)$$

$Q_{\text{пп}}$ — максимальный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$, нефтепродукта в течение одного часа; V_2 — объем, м^3 , нефтепродукта, содержащегося внутри аварийного участка трубопровода, ограниченного наиболее удаленными друг от друга соседними задвижками,

$$V_2 = 0,785L(D_h - 2\delta)^2. \quad (3)$$

Здесь D_h , δ — наружный диаметр, м, и толщина стенки трубы, м, на аварийном участке трубопровода длиной L , м;

2. При проколе нефтепродуктопровода объем истечения определяется как 2 % максимального объема прокачки в течение 14 дней:

$$V_3 = 0,02 \cdot 14 \cdot 24Q_{\text{пп}} = 6,72Q_{\text{пп}}. \quad (4)$$

Оценки потенциально возможного максимального количества разлившегося нефтепродукта, полученные по формулам (1)–(4), являются гипотетическими, поскольку вероятность возникновения таких событий чрезвычайно мала.

В практике эксплуатации трубопроводов подобные случаи наблюдались чрезвычайно редко благодаря предусмотренным в проектах техническим решениям (достигнутый уровень надежности эксплуатации трубопровода, оценка остаточного ресурса, своевременная диагностика, проведение профилактических мероприятий, оснащенность системами автоматизации и телемеханизации, наличие современных технических средств аварийно-восстановительных служб и т. д.), которые позволяют предотвратить аварии или обнаружить и ликвидировать их в кратчайшие сроки с минимальными последствиями.

Для прогноза более реальной ситуации при возможных авариях на трубопроводе следует пользоваться средними значениями ожидаемой (наиболее вероятной) массы утечек нефтепродукта, т. е. вероятностного максимума АРН, учитываяющего вероятностный характер их возникновения и развития.

Расчет вероятностного максимума $V_{\text{вер}}$ аварийного выхода перекачиваемого по трубопроводу продукта производится при рассчитанных априори значениях вероятности W_1 возникновения аварии с гильотинным разрывом трубопровода и вероятности W_2 прокола по формуле

$$V_{\text{вер}} = W_1(V_1 + V_2) + W_2V_3. \quad (5)$$

Пример. Допустим, что годовой объем перекачки нефти по трубопроводу Балтийской трубопроводной системы составляет 60 млн т в год. Плотность нефти 850 кг/м³.

Задача решена в среде Mathcad по программе «Максим объем.mcd».

Расход (объем прокачки нефти в секунду):

$$Q = \frac{\text{ММ}}{\text{ТТр}}; Q = 2,238 \text{ м}^3/\text{с.}$$

При гильотинном разрыве трубопровода:

Объем перекачки за 1 час — $Q_1 = Q \cdot 3600$; $Q_1 = 8,058 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{час.}$

Согласно методике — 25 % объема прокачки в течение 6 часов составит $V_1 = 0,25 \cdot 6 \cdot Q_1$; $1,209 \cdot 10^4 \text{ м}^3$.

Объем нефти, содержащийся в трубопроводе и ограниченный задвижками, определим при следующих исходных данных. Наружный диаметр трубопровода — $D = 0,72$ м. Толщина стенки трубопровода — $\delta = 0,01$ м. Расстояние между задвижками — $L = 15000$ м. Тогда

$$V_2 = \frac{\pi}{4}(D - 2\delta)^2 L = 5,773 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

Общий максимальный объем вылившейся нефти $V = V_1 + V_2 = 1,786 \cdot 10^4 \text{ м}^3$.

Таким образом, при гильотинном разрыве трубопровода максимальное истечение нефти составит 17860 м^3 , или 15 181 т.

При проколе трубы (2 % объема за 14 дней прокачки):

Прокачка за один день

$$Q_2 = Q_1 \cdot 24 = 1,934 \cdot 10^5 \text{ м}^3.$$

Прокачка за 14 дней

$$Q_{14} = Q_2 \cdot 14 = 2,707 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

Объем вылива при проколе

$$Q_P = Q_{14} \cdot 0,02 = 5,415 \cdot 10^4 \text{ м}^3.$$

Тогда

$$Q_P \cdot \rho = 4,603 \cdot 10^7 \text{ кг} = 46030 \text{ т.}$$

Итого при проколе расчетное значение вылитой нефти составит по объему 54150 м^3 , или по массе 46 030 т.

Оценка вероятного максимума разлива нефти.

Согласно методике вероятность гильотинного разрыва нефтепровода равна $W_1 = 0,326 \cdot 10^{-3}$. Вероятность прокола нефтепровода $W_2 = 1,751 \cdot 10^{-3}$.



Соответственно вероятная масса разлива при гильотинном разрыве трубопровода составит $M_{W_1} = M_T W_1 = 4,949$ т.

Вероятная масса разлива при проколе рассчитывается так: $M_{W_1} = Q_P \rho W_2 = 8,059 \cdot 10^4$ кг = 80,59 т.

Учитывая возможность или гильотинного разрыва, или прокола, расчетное вероятное значение массы истечения нефти составляет

$$M_{W_1} + M_{W_2} = 8,06 \cdot 10^4 \text{ кг.}$$

Таким образом, при вероятностной оценке аварийного выхода нефти из трубопровода с учетом приведенных значений вероятностей гильотинного разрыва и прокола трубопровода максимально ожидаемый выход нефти не превысит 80,6 т.

Рассмотренная методика определения объема выхода нефтепродукта из аварийного трубопровода удобна и проста в применении, но, естественно, имеет недостатки. Один из них состоит в том, что не учитывается профиль местности, который трубопровод фактически повторяет. Второй недостаток состоит в том, что в расчет принята условная вероятность разгерметизации трубопровода и возможность разгерметизации трубы считается равновероятной для любого сечения на выбранном участке трассы.

Если имеется возможность проанализировать трассу трубопровода между задвижками и определить наиболее опасные (наиболее вероятные по аварийности) участки, то в расчете производится дробление трассы, для каждого интервала определяется вероятность возникновения аварии на каждом участке и производится расчет максимального вероятного выхода нефтепродукта на каждом участке. Подобный анализ практически осуществить крайне затруднительно. В таком случае приемлем принцип недостаточности информации Лапласа: в пределах рассматриваемого участка трубопровода вероятность возникновения аварии полагают одинаковой, т. е. имеет место равновероятное распределение координат аварии.

Расчет вероятности выхода данного объема нефтепродукта определяется в предположении о нормальном законе распределения координата аварии по рельефу местности.

Тогда, оценив максимальное M_{\max} и минимальное M_{\min} значения объема выхода нефтепродукта, можно рассчитать математическое ожидание m и среднее квадратическое отклонение σ

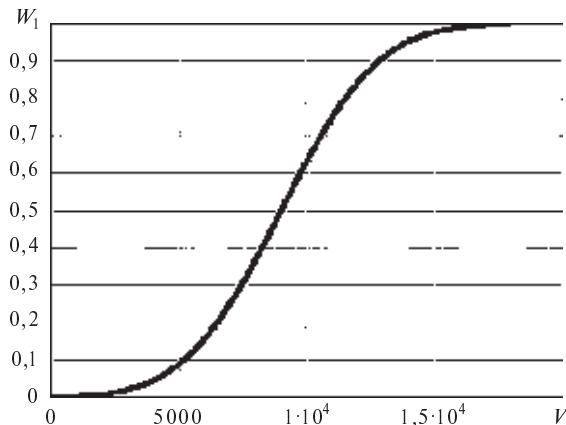


Рис. 1. Вероятность $W_1(V)$ того, что предполагаемое значение выхода объема нефтепродукта при гильотинном разрыве трубопровода не превысит V

ожидаемого выхода нефтепродукта, а также зависимость $W(M)$ вероятности того, что масса выхода нефтепродукта не превысит значения M .

$$m = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2}; \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{6}. \quad (7)$$

Вид функции изменения вероятностей выли-того нефтепродукта при нормальном законе распределения в предположении о нулевом мини-мальном объеме выхода и максимальном объеме, равном рассчитанным выше значениям (для гильотинного разрыва трубопровода $17,860 \text{ м}^3$ и для прокола — $54,150 \text{ м}^3$) приведены на рис. 1, 2.

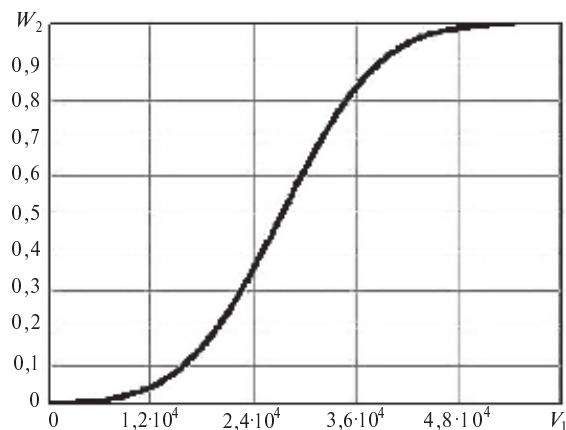


Рис. 2. Вероятность $W_2(V_1)$ того, что ожидаемое значение аварийного выхода нефтепродукта при проколе трубопровода не превысит значения V_1

Приведенные в расчетах (см. рис. 1, 2) вероятности — условные вероятности выхода нефтепродукта. Для перехода к безусловным вероятностям эти значения необходимо умножить на вероятность аварии трубопровода, рассчитанную согласно (1).

При проведении дальнейших исследований можно учесть влияние размера отверстия истечения и оценить размеры области, занятой разливом нефти при различном положении пробоины.

Разработанный метод оценки вероятного объема истечения нефти или нефтепродуктов из аварийного трубопровода представляется более рациональным, особенно при разработке мероприятий по ликвидации ожидаемых последствий аварий на нефтепроводах, но, как все вероятностные оценки, результаты расчетов существенно зависят от объема и достоверности статистических данных об аварийных ситуациях для конкретного участка трубопроводной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 августа 2000 г. № 613 «О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов».
2. Постановление Правительства от 15 апреля 2002 г. № 240 «О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации».

УДК 614.841.34

А.Ю. Акулов, В.В. Смирнов

АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВНИЯ ОГНЕЗАЩИТНОГО СОСТАВОВА ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

Огнестойкость металлических конструкций объектов нефтегазового комплекса (НГК) в условиях пожара составляет от 6 до 25 минут. Фактический предел огнестойкости металлоконструкций зависит от толщины сечения элементов, величины действующих нагрузок, температуры горения углеводородов и их количества. Такое поведение конструкций обусловлено низкой критической температурой — для некоторых стальных конструкций она составляет 400 °С. Это отрицательное свойство металлических конструкций приводит к необходимости создания у них огнезащитных покрытий. Проведенный анализ существующих покрытий [1] выявил необходимость разработки огнезащитного штукатурного состава на основе вспученного перлита, вермикулита и магнезиального цемента.

Для определения качественных показателей покрытия проведен ряд испытаний [2, 3]. Определены следующие физико-механические показате-

ли: объемная масса; прочность на сжатие; величина адгезии; водопоглощение. Полученные физико-механические свойства приведены в табл. 1.

Проведенные исследования различных композиций разработанного огнезащитного состава позволили сформулировать методику проектирования состава под конкретные физико-механические свойства. В ее основу заложен графический способ определения свойств материалов с помощью треугольных номограмм «состав — свойство» [4] (рис. 1). На разработанной номограмме точкам 1—5 соответствуют показатели физико-механических свойств пяти композиций, приведенных в таблице.

Данная номограмма позволяет определить необходимое количество вспученных вермикулита и перлита, а также магнезиального цемента. Определение компонентного состава производится в зависимости от заданных свойств покрытия. Номограмма «состав — свойство» (см. рис. 1) по-



Физико-механические свойства огнезащитного состава

Свойство	Показатели свойств и типы композиции				
	1	2	3	4	5
Равнодействующее, %	72,0	47,0	15,2	14,1	10,0
Антисия	Несущ.	Уплотн.	Уплотн.	Уплотн.	Уплотн.
Объемный вес, кг/м ³	234	340	452	552	671
Прочность на сжатие, МПа	0,5	1,3	2,0	2,6	3,3

зводят определять не только процентный состав огнезащитного покрытия, но и предусмотренные в них физико-механические свойства покрытия (объемный вес, водопоглощение, прочность).

Проведенные испытания на огнестойкость [5] партии образцов стальных пластин, защищенных от огня покрытием различной толщины, позволили выявить приведенную на рис. 2 зависимость огнестойкости металлической пластины от толщины огнезащитного покрытия композицией № 3 (табл. 1).

Покрытие обеспечивает максимальный предел огнестойкости металлоконструкций — 240 минут при толщине защитного слоя 44 мм (рис. 2). В результате проведенных исследований [5] получены зависимость огнестойкости от приведенной толщины металла и толщины покрытия (рис. 3).

Результаты исследований позволили сформулировать методику подбора сечения несущих металлических конструкций с огнезащитным покрытием различной толщины в зависимости от требуемой огнестойкости конструкций объектов нефтегазового комплекса. Для этого необходимо использовать данные, приведенные на рис. 3. Так, при необходимой огнестойкости 240 мин можно применять металлические элементы с приведенной толщиной металла 3,4 мм; 5,2 мм; 9,1 мм — в зависимости от нагрузки, действующей на данную конструкцию, и условий ее эксплуатации. Причем можно определять необходимую толщину покрытия для каждого сечения металлического элемента. Данные зависимости позволяют также определить необходимую толщину покрытия при известных значениях приведенной толщины металла.

Разработанное огнезащитное покрытие обладает высокими эксплуатационными показателями и обеспечивает повышенный предел огнестойкости металлических конструкций НГК. Применение рассмотренного состава возможно

в условиях атмосферных воздействий (осадки, отрицательная температура). Проведенные исследования физико-механических свойств и огнестойкости составов № 1 [1] и № 2 (ОС № 1, ОС № 2) дали возможность разработать методику проектирования огнезащитных составов в зависимости от предъявляемых требований к свойствам, сечению и огнестойкости металлических конструкций.

Проведенная работа позволяет построить алгоритм (рис. 4) методики проектирования физико-механических свойств и огнестойкости составов на основе минеральных термостойких заполнителей для конкретных условий применения на объектах НГК, который значительно упрощает процесс проектирования огнезащитных составов для металлических конструкций объектов нефтегазовой отрасли. Он включает:

1. Назначение требуемых пределов огнестойкости для металлических конструкций объектов

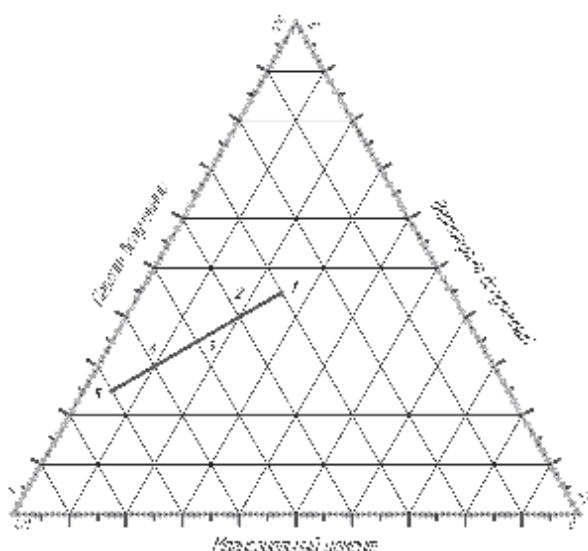


Рис. 1. Процентное содержание искомых компонентов при различных заданных свойствах огнезащитного состава

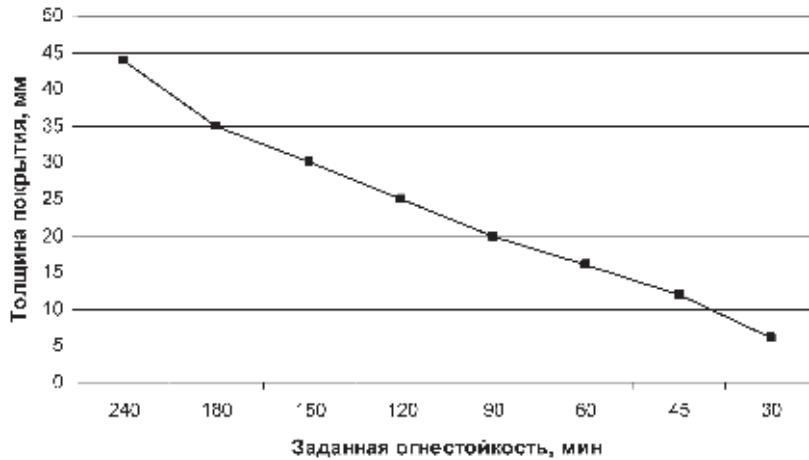


Рис. 2. Зависимость предела огнестойкости стальной пластины от толщины покрытия

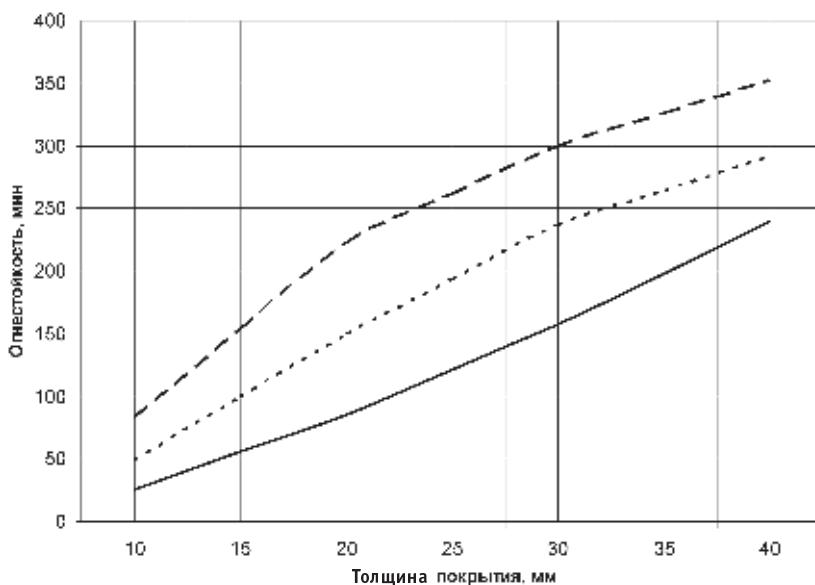


Рис. 3. Зависимость огнестойкости от толщины металла и покрытия для приведенной толщины 3,4 (—), 5,2 (- - -) и 9,1 (— —) мм

НГК по нормативным документам [6] и/или назначение повышенной огнестойкости в зависимости от условий эксплуатации (удаленность, возможное длительное воздействие высоких температур и т. д.).

2. Определение фактической огнестойкости металлических конструкций по результатам огневых испытаний и/или результатам инженерно-технических расчетов.

3. Проверка условия $\Pi_{\phi}^0 = \Pi_t^0$, при котором огнезащита либо требуется, либо нет: если усло-

вие выполняется, конструкция проектируется без огнезащитного покрытия; если — нет, то проводится проектирование огнезащитного покрытия.

4. В зависимости от условий эксплуатации (помещение и/или окружающая среда) назначается вид огнезащитного покрытия: ОС № 1 — для помещений, ОС № 2 — атмосфероустойчивый, для условий окружающей среды.

5. Определение заданных физико-механических свойств покрытия ОС № 1 или ОС № 2 (водопоглощение, объемный вес, прочность).

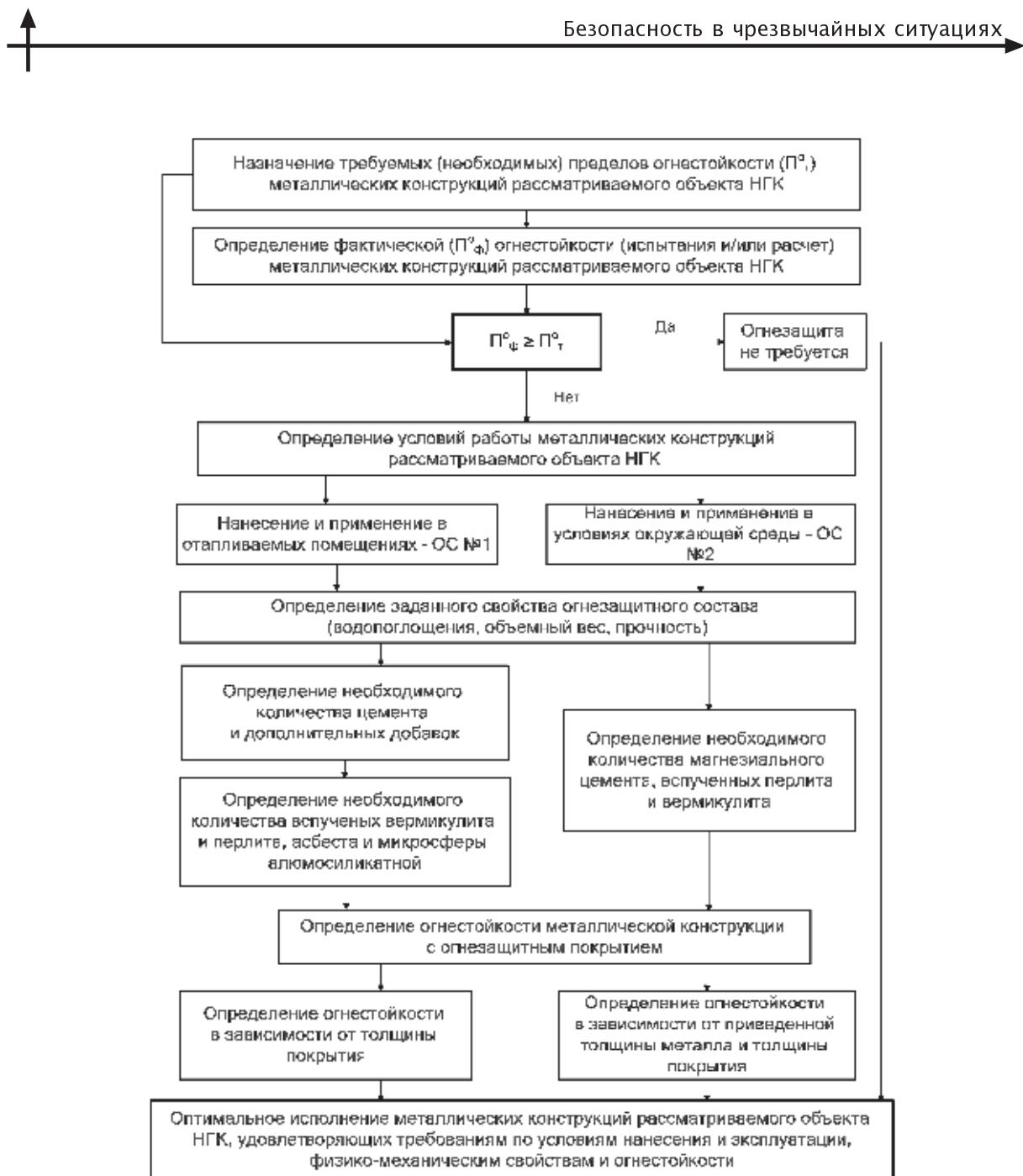


Рис. 4. Алгоритм проектирования огнезащитных составов

6. Определение количества каждого компонента входящего в состав огнезащитных покрытий ОС № 1 и ОС № 2 в зависимости от требуемых физико-механических свойств (рис. 1 [1]).

7. Определение огнестойкости металлических конструкций в зависимости от толщины покрытия и/или от приведенной толщины металла и толщины покрытия по графикам (рис. 2, 3 [1]).

8. Определение стоимости покрытия.

9. Оптимальное исполнение металлоконструкций.

Разработанный алгоритм проектирования огнезащитных покрытий для металлических конструкций объектов нефтегазовой отрасли учитывает все требования, предъявляемые к металлоконструкциям, эксплуатируемым в жестких условиях, позволяет повысить эффективность применения огнезащиты и дает возможность оптимально спроектировать вводимые в эксплуатацию объекты нефтегазовой отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов, А.Ю. Огнезащитное покрытие на основе минеральных термостойких заполнителей для металлических конструкций [Текст] / А.Ю. Акулов, В.А. Иванов, А.В. Аксенов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 4.— С. 263–266.
2. ГОСТ 17177–94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний [Текст].— Введ. 1996-04-01.— М.: Изд-во стандартов, 1981.— 19 с.
3. ГОСТ 15140–78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии [Текст].— Введ. 1979-01-01.— М.: Изд-во стандартов, 1981.— 7 с.
4. Денисов, А.С. Теплоизоляционные жаростой-
кие торкрет-массы на основе вермикулита [Текст] : учебник / А.С. Денисов, В.А. Швыряев.— М.: Стройиздат, 1973.— 104 севБАТеплоизол.
5. ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности [Текст].— Введ. 2009-02-18.— М.: Изд-во стандартов, 2008.— 14 с.
6. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Текст] : федер. закон: [принят Гос. Думой 4 июля 2008 г. : одобр. Советом Федерации 11 июля 2008 г.]— [1-е изд.].— М. : Проспект, 2009.— 114 с.

УДК 622.035

В.А. Боровиков, В. К. Сластиенко

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

На современном этапе развития горнодобывающей промышленности, гидротехнического и гражданского строительства, топливно-энергетического комплекса и других отраслей широко используется энергия взрыва. Резко возрос объем потребления и ассортимент промышленных взрывчатых веществ (ПВВ), в том числе ВВ простейшего состава и водоэмulsionионных ВВ, при производстве взрывных работ на суше, под водой и в городских условиях при разрушении старых фундаментов, зданий и инженерных сооружений, включая условия плотной городской застройки и чрезвычайные ситуации. Тип ВВ существенно влияет на технико-экономические показатели, эффективность и безопасность производства взрывных работ, включая минимизацию вредного действия по факторам сейсмо-взрывных, ударных воздушных волн и разлету осколков.

Проблема оценки эффективности использования ПВВ в конкретных условиях возникла еще в начале шестидесятых годов прошлого века при широком внедрении простейших и водоэмulsionионных ПВВ. В то время стандартные характе-

ристики — бризантность, работоспособность, скорость детонации, теплота и энергия взрыва — стали недостаточными для выбора рационального типа ПВВ. Именно тогда в США появились первые публикации по оценке эффективности использования ПВВ методом подводного взрыва [1, 2]. Этот метод базировался на фундаментальных трудах зарубежных (Р. Коул [3], Дюваль [2]) и отечественных (Ф.А. Баум [4], Ю.С. Яковлев [5] и др.) ученых.

Сущность способа оценки эффективности различных типов ПВВ методом подводного взрыва заключается во взрывании в воде заряда, массу которого выбирают из условия обеспечения стабильной детонации ВВ, т. е. величина диаметра заряда должна быть равна или больше критического диаметра испытуемого ВВ. При этом проводят измерения параметров подводной ударной волны и газового пузыря, характеризующих действие волны напряжений и продуктов взрыва, которые образуются в полости зарядной камеры. Преимущество этого способа — в использовании воды в качестве окружающей заряд среды, обладающей одинаковыми свойствами во



всех направлениях, и достаточно хорошо разработанной теории взрыва в воде, которая позволяет разделить энергию ударной волны и газового пузыря. В результате можно провести аналогию с энергией волн напряжений, обуславливающей предразрушение породы, и энергией продуктов взрыва в полости зарядной камеры, завершающей процесс разрушения и перемещение взорванной горной массы. Эффективность действия ВВ в этом случае оценивают сравнением суммы полученных энергий с потенциальной энергией взрыва. Основной недостаток этого метода — достаточно большое различие в условиях взрывания заряда ВВ в воде и в породе, т. е. различие в граничных и начальных условиях передачи энергии взрыва среде на границе заряд — среда. Сравнение оценок эффективности действия ВВ в воде и породе показывает, что имеет место существенное различие в характере нагружения и передачи окружающей среде энергии взрыва, которая увеличивается с ростом акустической жесткости среды.

Для учета физико-механических свойств твердых сред и диссипативных потерь энергии при их разрушении горное бюро США разработало количественный метод оценки измерения деформаций в волне напряжений [2], позволяющий производить сравнительную оценку эффективности ПВВ. Существенными недостатками этого способа были высокая трудоемкость размещения тензодатчиков в шпурах или в скважинах разрушающегося массива и невозможность обеспечения высокой точности результатов измерения.

Преодоление этих недостатков достигнуто путем регистрации параметров волны напряжений по методу преломленной в воду волны, который предложен профессором А.Н. Ханукаевым [6]. Этот метод заключается в формировании в массиве горных пород котлована с вертикальными стенками, заполняемого водой, или погружении в воду прямоугольных блоков; бурении параллельно свободной поверхности на заданном от нее расстоянии шпуром или скважин, в которых размещаются заряды, испытуемых типов ВВ. На расстоянии 2–4 мм от стенки, напротив эпицентра заряда, устанавливаются пьезоэлектрические датчики давления, регистрирующие преломленную в воду волну. Запись показаний датчика — эпюра давления в функции от времени — фиксируется с помощью катодного осциллографа на фотопленке. Процесс преломления с высокой степенью точности описывается в акустическом приближении. Экспериментальные эпюры «напряжение — время» для удлиненных зарядов аммонита № 6, взорванных в гранитном массиве на относительных расстояниях $\bar{r} = 70 R_{03}$ (R_{03} — радиус заряда), приведены в работе [6] — рис. 55 на стр. 59. В результате для указанных масс зарядов произведена количественная оценка амплитудно-временных параметров и установлена закономерность снижения амплитуды волны напряжения с ростом величины относительного расстояния при увеличении длительности положительной фазы волны напряжения. Эта методика позволила профессору А.Н. Ханукаеву прогнозировать увеличение эффективности дробления горных пород при увеличении мощности ВВ. Этот вывод хорошо согласуется с результатами работы профессора А.Ф. Беляева и Л.Н. Азбукиной [7], в которой установлено увеличение выхода мелких фракций при дроблении бетонных блоков более мощными ВВ.

Тем не менее оценка эффективности ВВ по методике преломленной в воду волны требует дальнейшего совершенствования, поскольку результаты базируются на измерениях, получаемых в средней и дальней зонах взрыва, где различия в параметрах волны напряжений существенно сглаживаются.

В связи с этим акцент в совершенствовании методики оценки эффективности ВВ делается на измерении параметров волны напряжений в ближней зоне взрыва, где четко прослеживаются различия в интенсивности волн напряжений при применении различных типов ВВ. Кроме того, при таком подходе представляется возможность оценивать показатель степени дробления по выходу кусков мелких фракций.

В основу нового способа оценки свойств ПВВ положена концепция измерения параметров волны напряжений в ближней зоне взрыва ($10 R_{03}$), где наиболее существенны диссипативные потери энергии, а также различия параметров волны и интенсивности дробления. Кроме того, в этом случае появляется возможность определять гранулометрический состав взрываемых образцов методом ситового анализа разрушенной массы с оценкой показателя дробления по среднему размеру куска:

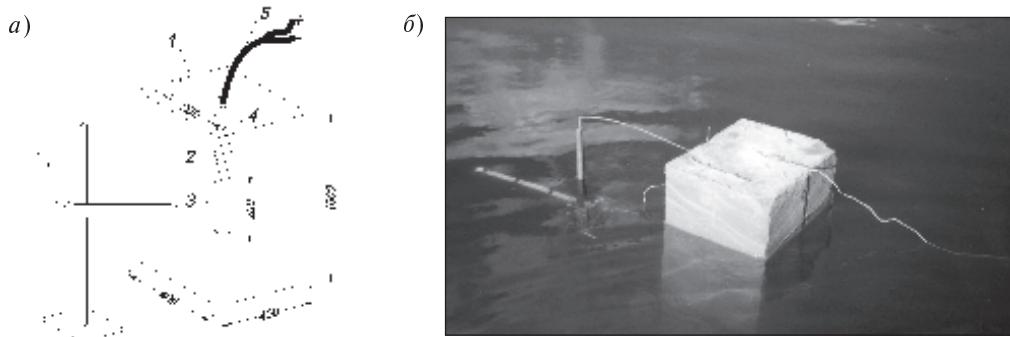


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) полигонных испытаний:
1 — бетонный блок; 2 — заряд ВВ; 3 — промежуточный детонатор;
4 — линия подрыва электродетонатора; 5 — пьезоэлектрический датчик

$$(d_k)_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{M} dk_i,$$

где M_i — масса i -й фракции; M — масса всех фракций; dk_i — средний размер i -й фракции; n — число отобранных фракций.

В качестве модельной среды использовался бетон марки 300, плотность которого составляла 2,2–2,3 г/см³ при средней скорости распространения звука 3500 м/с. Схема проведения опытов и общий вид размещения бетонного блока и пьезоэлектрических датчиков в воде приведены на рис. 1.

Сравнительная оценка эффективности промышленных ВВ малоплотного гранулита-ПЖ и гранулита-Ж нормальной плотности проводилась в бетонных моделях размером 0,3×0,4×1 м. В центре модели формировался шпур диаметром 0,04 м при глубине 0,7 м. Длина заряда гранулита-Ж равнялась 0,2 м, а для гранулита-ПЖ была в два раза больше. Инициирование ВВ осуществлялось от штатного электродетонатора с помощью промежуточного заряда из пластита мас-

сой 10–20 г. Устье шпура заполнялось песчано-глинистой забойкой. Для обеспечения сохранности датчиков они размещались на расстоянии 0,3 м от граней блока, строго напротив эпицентра взрыва. В каждом эксперименте использовалось по два пьезодатчика, размещенных напротив смежных граней модели. На рис. 2 приведена схема измерительного комплекса, состоящая из предусилителя типа ЗПУ-5П с большим входным сопротивлением и коэффициентом усиления $K_{yc} = 6$, пьезоэлектрических преобразователей (датчиков давления) и кабельной линии.

Сигнал поступал на запоминающий осциллограф С8-13 и фотографировался (рис. 3).

Строгая калибровка обеспечивала высокую степень точности измерения амплитудно-временных параметров.

Экран осциллографа снабжен масштабной сеткой. Коэффициенты вертикального отклонения (В/дел.) и временной развертки (мкс/дел.) строго фиксированы и проверяются перед регистрацией путем калибровки от внутреннего источника.

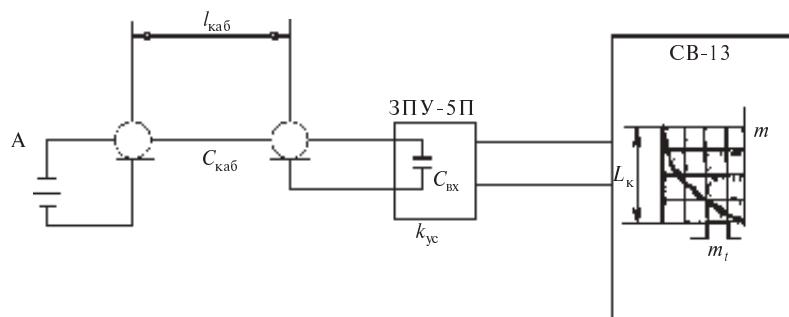


Рис. 2. Схема измерительного комплекса



Давление преломленной в воду волне рассчитывается по формуле

$$P = \frac{U_{\text{дат}} C_{\Sigma}}{S_{\text{дат}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{дат}}$ — напряжение на выходе пьезодатчика, В; C_{Σ} — суммарная емкость, подключенная к датчику, пФ; $S_{\text{дат}}$ — чувствительность пьезодатчика, $\frac{\text{В} \cdot \text{пФ}}{\text{КГС}/\text{см}^2}$.

Суммарная емкость состоит из емкости кабеля $C_{\text{каб}}$ и входной емкости предусилителя $C_{\text{вх}}$:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{каб}} + C_{\text{вх}}. \quad (2)$$

Поскольку $C_{\text{каб}} \gg C_{\text{вх}}$, то $C_{\Sigma} = C_{\text{каб}}$. В свою очередь, напряжение на входе датчика определяется зависимостью вида

$$U_{\text{дат}} = \frac{U_{\text{осн}}}{k_{yc}}. \quad (3)$$

С другой стороны, напряжение на входе осциллографа — $U_{\text{осн}}$ равно

$$U_{\text{осн}} = l_c m_v, \quad (4)$$

где l_c — амплитуда сигнала на осцилограмме, выраженная в делениях по вертикали; m_v — масштаб коэффициента вертикального отклонения,

$$\frac{\text{В}}{\text{дел}}.$$

С учетом выражения (2) и (4) формула (1) примет вид

$$P = \frac{l_c m_v C_{\Sigma}}{k_{yc} S_{\text{дат}}} \cdot \frac{\text{КГС}}{\text{см}^2}. \quad (5)$$

Аналогичным образом определяются временные параметры:

$$\tau_t = l_t m_v, \quad (6)$$

где l_t — расстояние между метками на осцилограмме по горизонтали в делениях шкалы;

m_t — масштаб времени развертки, $\frac{\text{мкс}}{\text{дел}}$.

Значение емкости кабеля $C_{\text{каб}}$ определялось путем зондирования измерительной линии короткими импульсами с регистрацией времени между зондирующими и отраженным сигналами. В зависимости от условий проведения опытов длина кабеля $l_{\text{каб}}$ принималась в диапазоне 30–100 м. На первом этапе проведена расшифровка

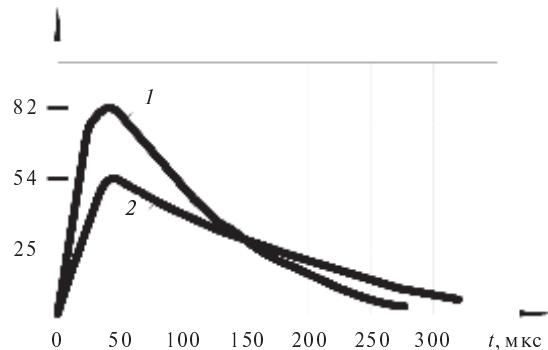
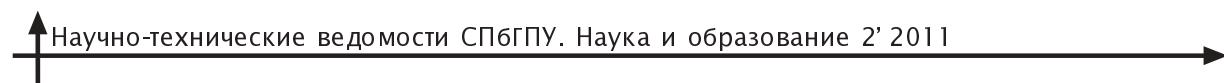


Рис. 3. Типичные осциллограммы — «напряжение—время»:
1 — при взрыве гранулита-Ж,
2 — при взрыве гранулита-ПЖ

амплитудно-временных параметров преломленных в воду волн для двух указанных выше типов ВВ. Приведенные на рис. 3 типичные осциллограммы $P=f(t)$ для зарядов гранулита-Ж и гранулита-ПЖ получены при взрывах в бетонных блоках. Проведенная расшифровка осциллограмм позволила произвести оценку максимальных амплитуд волн напряжений и длительности действия положительной фазы волны. Для равных условий проведения экспериментов (масса заряда, расположение зарядов относительно границы раздела «бетон — вода» и расстояние расположения пьезодатчика до вертикальной грани блока) установлено, что амплитуда волны напряжения при взрыве малоплотного гранулита-ПЖ составляет примерно 65 % от значения амплитуды волны, генерируемой зарядом гранулита-Ж. При этом длительности действия положительных фаз волн напряжений близки.



Рис. 4. Общий вид взрыва заряда гранулита-Ж при взрыве бетонного блока



Анализ формы эпюра «давление — время» и выполненных расчетов амплитуд и длительностей положительных фаз волны напряжений показывает существенный рост напряжений, генерируемых зарядами ВВ с более высокой плотностью (гранулит-Ж). С другой стороны, градиент спада напряжения за фронтом волны существенно ниже у малоплотного гранулита-ПЖ. Эти эксперименты в полной мере подтверждают сделанный в работе [8] вывод о квазистатическом характере действия взрыва малоплотных ВВ. При этом интенсивность дробления бетонных моделей, взорванных гранулитом-Ж, будет существенно выше, а у взорванных гранулитом-ПЖ дробление характеризуется наличием более крупных фракций. Таким образом, изложенная методика позволяет четко определить область эффективного использования различных типов ВВ, а именно: более мощные ВВ рекомендуется использовать для повышения степени дробления, а малоплотные ВВ — для щадящего взрыва при добыче кристаллосырья, выколке блочного камня и осторожного взрывания в условиях плотной городской застройки.

Подводя итоги работы, можно утверждать:

1. Усовершенствован способ оценки эффективности ПВВ методом подводного взрыва, отличающийся размещением заряда в блоке или керне горных пород — твердых сред с параметрами, которые позволяют обеспечивать нормальный режим детонации и учитывать диссилиативные потери энергии взрыва в породах различной акустической жесткости.
2. Диаметр испытуемого заряда должен быть больше или равным критическому диаметру детонации испытуемых ВВ, а размеры модели принимаются из условия $d_{\text{мод}} = 10 R_{03}$ (R_{03} — радиус заряда).
3. Выполнена сравнительная оценка интенсивности параметров волны напряжений для типов ПВВ, существенно отличающихся плотностью заряжания.
4. Установлено существенное снижение амплитуды и интенсивности волны напряжений зарядов малоплотного гранулита-ПЖ по сравнению с зарядами гранулита-Ж нормальной плотности.
5. Показана область эффективного использования малоплотных ВВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седвин, Л.Д. Оценка взрывчатых свойств ВВ методом подводного взрыва. Разрушение и механика горных пород [Текст] / Л.Д. Седвин, С.М. Куйлей, С.И. Портер, Р.Х. Стресо.— М.: Госуд. научно-техн. изд-во по горному делу, 1962.
2. Томас, С. Сравнение двух методов оценки свойств взрывчатых веществ. Разрушение и механика горных пород [Текст] / С. Томас, Атчисон [и др].— М.: Госуд. научно-техн. изд-во по горному делу, 1962.
3. Коул, Р. Подводные взрывы. Издательство иностранной литературы. 1950.
4. Баум, Ф.А. Физика взрыва [Текст] / Ф.А. Баум.— М.: Наука, 1975.
5. Яковлев, Ю.С. Гидродинамика взрыва [Текст] / Ю.С. Яковлев.— Л.: Изд-во судостр. промышленности, 1961.
6. Ханукаев, А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении горных пород [Текст] / А.Н. Ханукаев.— М.: Госгортехиздат, 1962.
7. Беляев, А.Ф. Влияние свойств заряда ВВ на разрушение блоков цементного раствора [Текст] / А.Ф. Беляев, Л.Н. Азбукина // Сб.: «Взрывное дело».— М.: Госстройиздат, 1960.
8. Боровиков, В.А. Параметры волны напряжений при взрыве малоплотных ВВ [Текст] / В.А. Боровиков, А.А. Рыскунов, В.К. Сластенко // Сб.: Взрывное дело. М., 1999.— № 92/49.



МОДЕЛИРОВАНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК 521:523.4:524.83:524.88

В.Ф. Космач

КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АБСОЛЮТНОЙ ШКАЛЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ЛЕТОИСЧИСЛЕНИЯ ЗЕМЛИ

В работах [1, 2] показана принципиальная возможность квантово-механического анализа геологической истории Земли как составной квантовой частицы, являющейся членом Солнечной системы, которая, в свою очередь, также квантовая.

Непривычность методики анализа не может быть причиной излишне осторожного к ней отношения, так как, во-первых, классическую механику можно рассматривать как одну из составных частей квантовой и, во-вторых, применение новой и более общей квантовой методики анализа позволяет, как правило, получать новые результаты. Так, например, применение квантовой методики [2] позволило в настоящей работе установить, что ядро Земли имеет спин $S = 24$. Это означает, что магнитная ось Земли не только прецессирует вокруг географической, но и участвует в процессе нутации. Поэтому экспериментально обнаруженные постепенные смещения магнитных полюсов на поверхности Земли [3] — это, вероятно, частичное следствие прецессии и нутации магнитного момента нашей планеты, так как угол между спинами ядра и Земли составляет $11,5^\circ$ в современной геологической эпохе.

В настоящее время выполнить достаточно строгий квантово-механический расчет геологической истории Земли не представляется возможным, так как, во-первых, такой расчет — задача чрезвычайной сложности вследствие неоднозначности знаний физических основ ее решения и, во-вторых, современная геофизика не имеет пока достаточных для такого решения экспериментальных данных о физике процессов, протекающих внутри нашей планеты. В то же время ход этих процессов имеет настораживающий характер, который требует незамедлитель-

ного анализа, пусть и приблизительного, но позволяющего понять физику процессов, которые происходят сейчас в ядре и мантии Земли, и сделать физически обоснованные выводы, а возможно, и прогнозы.

В предлагаемой статье впервые выполнен такой анализ на основе современной квантовой механики [4] и экспериментально установленной абсолютной шкалы геологического летоисчисления Земли (табл. 1) [3]. В табл. 1 индекс i соответствует номеру геологической эпохи начиная с Кембрийской ($i = 1$), в столбцах с индексами $k = 1$ и $k = 2$ приведено время начала/конца эпохи i соответственно. Единицей измерения времен, приведенных в столбцах $k = 1$ и $k = 2$, принято $t_0 = 10^6$ лет. Сейчас человечество живет в Новейшей эпохе ($i = 18$), которая началась приблизительно 10^4 лет назад [3] с Ледникового периода в Северном полушарии и «великой тряски и большой воды» в Южном [2].

В столбце $k = 3$ (табл. 1) приведены величины $\lambda_i = 1/\tau_i$, которые являются средними плотностями вероятности перехода эпохи i к следующей ($i + 1$)-й, а зависимость $\lambda_i(t)$ представляет собой гистограмму со ступенями высотой λ_i и шириной τ_i . Средняя длительность эпох равна приблизительно $30t_0$, и переход от одной эпохи к другой осуществляется очень быстро (квантовым образом) с учетом планетарного масштаба перехода [2], но только после окончания времени τ_i . Такое возможно, если полагать, что в течение времени τ_i средняя плотность вероятности распада эпохи (λ_i) должна быть равна средней плотности вероятности ее восстановления.

Таблица 1

Абсолютная шкала геологического летоисчисления ($i = 1-18$; $k = 1,2$).

Геологическая эпоха	j	i	k				
			1	2	3	4	5
Кембрийская	1	1	0/80	80	0,0125	40	85
Ордовикская	1	2	80/140	60	0,0167	140	57
Силурская	1	3	140/200	60	0,0167	140	57
Девонская	1	4	200/240	40	0,0250	220	41
Миссисипская	1	5	240/270	30	0,0333	270	31
Ценозианская	1	6	270/300	30	0,0333	270	31
Пермская	2	7	300/350	50	0,0200	25	54
Триасовая	2	8	350/390	40	0,0250	70	40
Юрская	2	9	390/425	35	0,0286	107,5	32
Нижнекемская	3	10	425/470	45	0,0222	22,5	43
Верхнекемская	3	11	470/490	20	0,0500	55	21
Палеоген	3	12	490/500	10	0,1000	80	11
Эоцен	3	13	500/510	10	0,1000	80	11
Олигоцен	3	14	510/520	10	0,1000	80	11
Миоцен	4	15	520/535	15			
Неоген	4	15–16	520/540	20	0,0500	10	21
I Палеозой	4	16	535/540	5			
II Палеоген	4	17	540/550	10	0,1000	30	9
Новейшая	4	18	550/560	10	0,1000	30	9

Поэтому в дальнейшем λ_i имеет двоякий смысл и употребляется в тексте статьи как в одном, так и в другом качестве, которое всегда понятно из контекста статьи.

Изтабл. 1 для $k = 3$ следует, что функция $\lambda_i(t)$ имеет вид достаточно сложной гистограммы, отличительными особенностями которой являются:

некоторая периодичность функции $\lambda_i(t)$, каждый последующий максимум которой находится на «пьедестале» правой нисходящей ветви предыдущего. Эти максимумы по оси i находятся в областях 5, 6; 8, 9; 12, 13, 14; 17, которые завершают цепочки от трех до шести следующих друг за другом эпох. Обозначим индексом $j = 1, 2, 3, 4$ номера цепочек, которые начинаются с эпохи $i_1 = 1, 7, 10, 15$ и завершаются соответственно вышеуказанными максимумами (табл. 1). Для удобства дальнейшего анализа было принято, что t означает время, которое изменяется в пределах от 0 до t_i каждой эпохи i , а t_i — это среднее время каждой ступеньки гистограммы λ_i для цепочки j , отсчитываемое от начала первой эпохи (i_1) этой цепочки (табл. 1, $k = 4$). Следует отметить, что встречаются группы эпох i (2, 3; 5, 6; 12, 13, 14), в которых эпохи формально ничем не отличаются друг от друга. Для правиль-

ной обработки экспериментальной гистограммы λ_i необходимо полагать, что каждая из указанных групп эпох принадлежит одной общей ступеньке гистограммы, и время t_i является серединой этой ступеньки;

увеличение высоты максимумов гистограммы λ_i с ростом i , которое особенно заметно при переходе от $i = 10$ к $i = 12-14$ и далее к $i = 17$;

постепенное уменьшение средней продолжительности эпох с увеличением i . Эта продолжительность равна $50t_0$, $35t_0$, $10t_0$ соответственно для эр палеозоя ($1 \leq i \leq 7$), мезозоя ($8 \leq i \leq 11$) и кайнозоя ($12 \leq i \leq 18$).

Попытки объяснить периодичность функции $\lambda_i(t)$ с учетом вышеперечисленных особенностей с помощью известных периодических функций не увенчались физически значимым успехом. Для понимания физики поведения функции $\lambda_i(t)$ решающим обстоятельством стало то, что $\lambda_i(t)$ при $i > i_1$ с учетом дополнительной постоянной величины («пьедестала») могла быть с достаточной точностью и физически однозначным образом аппроксимирована для данного j нижеследующей зависимостью:

$$N2(j, i, t) =$$



$$= N2(j, i1, t_{i1}) + N_1(1 - e^{-\lambda_j t_i}) + N_2(1 - e^{-\lambda_j t}) = \\ = N2(j, i1, t_{i1}) + V_1 t_i + V_2 t, \quad (1)$$

где $N2(j, i1, t_{i1}) = V_1 \tau_{i1} / 2$ и $\lambda_j t_i \ll 1$, $\lambda_j t \ll 1$.

Высота пьедестала для каждого j сложным образом зависит от энергии, накопленной ядром за всю предыдущую историю своего возникновения и развития. Эта высота должна стать предметом специального исследования, так как для изучения истории возникновения и развития ядра Земли необходима соответствующая квантово-механическая модель, которая пока недостаточно актуальна для приближенного решения основной задачи настоящей работы. Следует, однако, отметить, что высота пьедестала постоянно возрастает с увеличением j , что однозначно свидетельствует об увеличении запасов энергии в ядре в процессе его эволюции.

Зависимость (1) свидетельствует о том, что в случае Земли как квантовой системы происходит накачка в течение эпохи i населения $N2 \sim \lambda_i$ некого метастабильного уровня с постоянной скоростью V_2 и различными начальными условиями для каждой эпохи цепочки j , которые монотонно изменяются со временем t_i и скоростью V_1 : $N2(j, i, t_i) = V_1 \tau_{i1} / 2 + V_1 t_i$, $i > i1$. Анализ экспериментальной гистограммы λ_i показал, что $V_2 = 0,1/t_0$ для всех эпох от $i = 1$ до $i = 18$; $V_1 = 0,02/t_0$, $V_1 = 0,04/t_0$ соответственно для цепочек $j = 1; 2$ и $j = 3; 4$. Важно отметить, что указанные значения для V_1 практически совпадают с величинами τ^{-1} , где $\tau = \tau_{12}$, $\tau = \tau_{34}$ — средние длительности ступенек гистограммы λ_i для цепочек $j = 1; 2$ и $j = 3; 4$ соответственно. Этот результат однозначно свидетельствует о том, что V_1 (V_2) имеет не абсолютный, а относительный смысл, следовательно, такой же смысл имеют функции $N2(j, i, t)$ и $N2(j, i1, t_{i1})$. Поэтому в начале эпохи $i1$ каждой цепочки j значения этих функций выбирались равными нулю, чтобы уменьшить число параметров при анализе геологической истории Земли. О скорости V_2 будет сказано позже, однако ее постоянство — очевидное следствие постоянства угловой скорости вращения Земли [3, 6].

Физическая концепция геологического летоисчисления Земли

В настоящей статье предлагается следующая концепция геологической истории Земли:

Ядро Земли смешено на 1140 км в сторону Тихого океана [3], и, следовательно, гравитационный потенциал Земли в области ее ядра не обладает сферической симметрией из-за разной толщины коры и мантии на континентальном и океанском полушариях Земли. Вращение Земли как симметрического ротора неизбежно, вследствие кориолисового взаимодействия [4], вызывает колебания вещества ядра, мантии и коры в плоскостях, перпендикулярных оси вращения нашей планеты. Основной вклад в энергию этих колебаний и сопутствующих им токов вращения [4] вносит ядро как очень весомая, жидкая и самая динамичная часть Земли. Можно с уверенностью полагать, что эти колебания имеют квантовый характер, так как ядро обладает чисто квантовой характеристикой — спином. Меньший вклад в энергию вышеуказанных колебаний и сопутствующих им токов вращения вносят кора и мантия Земли. Колебания поверхности коры и мантии Земли имеют вертикальный характер и приводят к вертикальным перемещениям литосферных плит (континентов) Земли (геологическая модель — фиксизм), а сопутствующие колебаниям токи вращения приводят к значительным горизонтальным перемещениям вещества мантии и литосферных плит (геологическая модель — мобилизм). В результате тектонические движения есть следствие вращения Земли как квантового симметрического ротора. В дальнейшем будем анализировать колебания ядра Земли как наиболее значимого инициатора тектонических движений.

Наиболее вероятные колебания ядра — квадрупольные [7], возникновение которых пространственно возможно, так как на глубине 2900 км между ядром и мантией имеется пограничная область Вихерта — Гутенберга [3, 6]. Для квадрупольных колебаний характерна эквидистантная система уровней энергий возбуждения: $E_1(2^+)$, $E_2(4^+)$, $E_3(6^+)$..., где 2, 4, 6 ... являются спинами энергетических уровней квадрупольных колебаний E_1 , E_2 , E_3 соответственно. Теоретически число таких уровней должно быть равно 12.

Можно обоснованно полагать, что в первом приближении квантовые квадрупольные колебания вещества ядра представляют собой стоячие поперечные волны в плоскостях, перпендикулярных спину Земли. В этих же плоскостях протекают токи вращения по замкнутым траекториям

вокруг спина Земли и вызывают дифференциальные конвекционные токи, которые двигаются в плоскостях, перпендикулярных спине ядра, и создают магнитное поле Земли вследствие динамо-эффекта [5].

Примем для дальнейшего анализа гипотезу о том, что ядро Земли является импульсным квантовым усилителем (КУ) упругих (сейсмических) волн. Роль квазичастиц в этом КУ играют токи вращения активного вещества ядра. Будем полагать, что КУ имеет систему трех колебательных уровней: E_1 (нижний уровень), E_2 (метастабильный уровень), E_3 (полоса поглощения). Полоса поглощения может, например, представлять собой совокупность уровней от $E_3(6^+)$ и выше, которые уже начали объединяться друг с другом вследствие большой ширины, но, возможно, сохраняют еще свою квантовую индивидуальность. Выбор более сложных систем уровней КУ не имеет принципиального значения, а только обоснованно усложняет изложение методики решения основной задачи настоящей работы.

Накачка КУ происходит с постоянной скоростью (V_2), пропорциональной частоте вращения Земли, в результате кориолисового взаимодействия между спинами ядра и Земли [4].

Согласно современным представлениям ядро — это шар, который обладает внутренней структурой [6], включая:

внутренний сферический слой с радиусами от 0 до 1217 км, проницаемый для поперечных упругих волн, скорость распространения которых равна приблизительно 3,5 км/с;

внешний сферический слой с радиусами от 1217 до 3485 км, полностью непроницаемый для поперечных упругих волн, скорость распространения которых равна нулю.

Отличие в скоростях (0 и 3,5 км/с) может быть связано с возникновением стоячих волн во внешнем слое и их отсутствием во внутреннем. Следует отметить, что практически все вещество ядра сосредоточено в его внешнем слое и является активным для работы КУ. Возможный переход вещества внутреннего слоя ядра в активное состояние увеличит мощность КУ лишь на несколько процентов.

Накачка КУ происходит за счет энергии вращения Земли как симметрического ротора. Эта энергия постоянно пополняется в результате действия сил гравитационного взаимодействия ротора, обладающего квадрупольным моментом,

с Солнцем и планетами Солнечной системы. Компоненты ускорения свободного падения, касательные к поверхности Земли, экспериментально измерены [3, 6] и, вероятно, частично связаны с действием вышеуказанных сил, которые включают в себя и силы «конфликта» [1, 2]. В случае непрерывной накачки лавинообразный рост интенсивности вынужденного излучения прекращается при недостаточной мощности источника накачки тогда, когда число квазичастиц в виде токов вращения на метастабильном (N_2) и нижнем (N_1) уровнях выравнивается, так как коэффициент квантового усиления пропорционален ($N_2 - N_1$) [5].

Необходимо отметить особенности ядра Земли как квантового усилителя. Ядро Земли не является единым КУ, так как относительно невелика скорость распространения взаимодействия, и разные области ядра находятся в различных начальных и внешних условиях накачки, а именно:

радиус ядра равен приблизительно 3500 км, и, следовательно, время распространения взаимодействия в виде, например, движения продольных волн со средней скоростью 10 км/с [6] одновременно по радиусу и периметру ядра составляет от минут до 1 часа, что затрудняет его работу как единого КУ;

ядро смещено на 1140 км в сторону Тихого океана от центра Земли, и тяготеющие массы коры и мантии распределены вокруг ядра очень неравномерно, что изменяет внешние условия накачки для разных частей ядра.

Вышеуказанные причины позволяют обоснованно полагать, что ядро представляет собой набор локальных КУ, обладающих различной массой активного вещества. Если локальные КУ имеют приблизительно одинаковые массы, находятся в одинаковых начальных условиях и условиях накачки, тогда они образуют группы, в которых готовность к импульсному излучению достигается сравнительно одновременно. Накачка других локальных КУ происходит с различной эффективностью, что приводит к возникновению в них значительных флуктуаций δN_1 и δN_2 относительно средних по ядру значений N_1 и N_2 . Эти флуктуации служат причиной возникновения в течение каждой эпохи i вынужденного излучения упругих (сейсмических) волн отдельными локальными КУ, что вызывает локальные землетрясения, очаги которых залегают на глубине 20–30 км в области поверхности



Мохоровича, пограничной между мантией и корой Земли. Согласно [3, 6] единицей измерения энергии таких землетрясений принята магнитуда M . Землетрясение, магнитуда которого принята за единицу ($M = 1$), расходует энергию около 10^{12} эрг и является «очень слабым». Наиболее сильные землетрясения («катастрофические») как правило не превосходят $M = 8,5$, что соответствует энергии до 10^{27} эрг. Прирост магнитуды на 0,5 эквивалентен увеличению энергии землетрясения приблизительно в 10 раз. В табл. 2 приведены данные [3] о среднем числе землетрясений в год (n) со средними магнитудами $M \geq 3,5$ и энергией E (эрг) одного землетрясения. Сведения о землетрясениях с меньшей магнитудой получены в настоящей работе путем наиболее вероятной экстраполяции с помощью геометрической прогрессии.

Из табл. 2 следует, что ядро Земли можно представить в виде ансамбля КУ различной мощности числом до $\sim 10^8$. Простые оценки показывают, что в среднем каждый КУ содержит такую массу активного вещества ядра, которая приблизительно равна массе воды нескольких тысяч Ладожских озер.

Для удобства дальнейшего рассмотрения условно разобъем все КУ на три большие группы: малой ($M < 2,5$), средней ($2,5 \leq M < 5$) и большой ($M \geq 5$) мощности. Следует отметить, что с увеличением мощности возрастает масса активного вещества КУ, увеличивается время накачки до критического состояния и уменьшаются флуктуации δN_1 и δN_2 . В результате каждую из групп можно анализировать независимо от всех остальных.

КУ малой мощности ($M < 2,5$), которые излучают сейсмические волны практически непрерывно, являются, вероятно, основным источником следующего:

микросейсмических колебаний первого рода, которые представляют собой планетарные микроскопические колебания коры Земли с частотами от 0,03 до 100 Гц и хорошо изучены экспериментально [6]. Поэтому кору Земли можно представить себе как колокол, который постоянно излучает инфразвуковые волны. Необходимо отметить, что инфразвуковые волны большой мощности могут возникать и локально в случае воздействия импульса упругих волн от локально-го КУ достаточно большой мощности. В результате поверхность Земли может стать локальным

Таблица 2
Данные о числе n землетрясений в год, их средних магнитудах M и энергиях E

n	M	E
10^8	0,5	10^{11}
10^7	1,5	10^{13}
10^6	2,5	10^{15}
10^5	3,5	10^{17}
10^4	4,5	10^{19}
10^3	5,5	10^{21}
10^2	6,5	10^{23}
10	7,5	10^{25}
1	8,5	10^{27}

источником инфразвуковых волн такой мощности, которая опасна для живых существ (в конце 2010 года СМИ США сообщали о массовой локальной гибели стай птиц. Последующее изучение выявило, что внутренние органы птиц имели повреждения, которые возникают в случае воздействия мощной инфразвуковой волны);

квазистационарного излучения радиоволн с частотами от 10^3 Гц и выше вследствие квадрупольных колебаний активного вещества КУ, которое является проводящим; оно может колебаться в пределах, разрешенных шириной полосы поглощения и уровнями E_1 и E_2 . Такие радиоволны, как и радиоволны, излучаемые КУ ($M < 2,5$), в процессе генерации сейсмических волн способны вызвать свечение верхних слоев атмосферы, которое по сообщениям СМИ уже наблюдалось на севере Канады во время полярной ночи 2010/2011 года и при этом не было полярным сиянием;

импульсного электромагнитного излучения большой мощности в случае возникновения импульса упругих волн от локальных КУ достаточной мощности.

Наблюдения вышеперечисленных явлений показывают, что количество энергии в ядре Земли постепенно возрастает с увеличением j , и, следовательно, увеличиваются частота излучения, частота импульсов излучения и энергия упругих волн КУ малой мощности. В настоящее время ($i = 18$) это увеличение достигло уровня, который был замечен людьми и отнесен СМИ как непонятное пока явление.

Рассмотрим КУ средней и большой мощности ($M \geq 3,5$). Излучение сейсмических волн такими

КУ в течение эпохи опасно само по себе, но оно может вызвать еще и тектонические землетрясения. По сообщениям СМИ перед землетрясением в Японии (март 2011 года), отнесенными к классу «сильной катастрофы» [3, 6], произошло более слабое, которое ввело в заблуждение японских сейсмологов, и в результате не был объявлен нужный уровень тревоги. Большинство КУ ($M \geq 3,5$) достигает критического состояния, необходимого для излучения упругих волн, к концу эпохи. И, следовательно, землетрясения, вызванные сейсмическими волнами КУ, являются причинами смены одной эпохи на другую. Следует отметить, что в этом случае КУ ($M \geq 3,5$) излучают сейсмические волны, как правило, последовательно друг за другом в результате развития каскада переходов, который свойственен для квантовых систем (вспомним, например, механизм образования электронов Оже). Возникновение каскада землетрясений, который продолжался «много-много дней и много-много ночей», отмечено и в мифе австралийцев, анализ которого выполнен в работе [2]. Длительность одиночных землетрясений не превышает 10 минут. Если каскад землетрясений будет достаточно развит, тогда произойдет смена одной эпохи на другую, при этом сейсмические волны каскада могут вызвать еще и тектонические землетрясения. Смена одной эры на другую происходит подобным образом, но с выделением дополнительной энергии, которая накапливается в течение всей цепочки j в КУ большой мощности. Это накопление подтверждается экспериментальными данными в виде роста значений функции $\lambda_i(t)$ при $i \geq 12$ по сравнению с $i \leq 3$.

Результаты моделирования геологического летоисчисления Земли

Рассмотрим в качестве примера цепочку $j = 1$, которая первична для всех последующих цепочек. Ранее ее находится позднедокембрийская эпоха, большая длительность которой ($1050t_0$) показывает, что в эту эпоху не было особо значимых событий в геологической истории Земли, и поэтому в настоящей работе анализ был начат с кембрийской эпохи ($i = 1$).

Последовательная смена эпох от $i = 1$ до $i = 18$ и цепочек от $j = 1$ до $j = 4$ происходила в результате каскадов землетрясений планетарного масштаба, энергия которых — величина случайная. Для расчетов этой сложной цепочки

последовательных квантовых переходов можно применить метод случайных испытаний, который и был реализован Землей, но она прошла все цепочки i и j так, как получилось (табл. 1, $k = 3$). Для теоретических расчетов такой метод не может быть применен, так как неизвестны ни функции плотности вероятности для его реализации, ни способы их получения с учетом особой специфики рассматриваемых КУ.

Остается только надеяться на то, что Земля прошла свой путь наиболее вероятным и, следовательно, аналитически предсказуемым способом, в результате чего становится возможным применение зависимости (1). Такой метод сравнительно легко реализовать, так как, во-первых, время смены одной эпохи на другую приходило в среднем при одинаковых соотношениях между $N1$ и $N2$ для тех КУ, которые были инициаторами каскадов; во-вторых, в этих КУ $N2$ в среднем возрастало с постоянной скоростью накачки в течение эпохи i .

Величины V_1 (см. (1)) были оценены путем подробного попарного численного сравнения экспериментальных значений λ_i (табл. 1, $k = 3$) для каждой из цепочек j с обязательным соблюдением правил работы с гистограммами, а затем согласованы между собой с помощью графических построений в укрупненном масштабе, так как «лучше один раз увидеть...».

Согласно предложенной концепции функции $N2(j, i, t_i)$ и $N2(j, i, t)$ должны быть кусочно-непрерывными с разрывами конечной величины в точках перехода от эпохи i к $i + 1$ и от цепочки j к $j + 1$. Такая особенность этих функций хорошо подтверждается экспериментально (табл. 1, $k = 3$); она связана с накачкой КУ в течение одной эпохи и резким уменьшением населения $N2$ в моменты перехода к другой эпохе или, тем более, к другой цепочке.

Величины разрывов имеют случайный характер, относительно большие из них выходят за пределы вероятной экспериментальной ошибки ($\pm 0,05$ [8]), а наиболее вероятные лежат в пределах этой ошибки, и, следовательно, в первом приближении можно полагать, что $V_2 \approx 0,1/t_0$.

На первый взгляд, оценка скорости V_2 — дело необычное, так как $N2(j, i, t) \sim \lambda_i$, а λ_i является постоянной величиной для данного i , т. е. скорость роста ее равна нулю. Однако накачка КУ происходит непрерывно в течение эпохи i , и, следовательно, $N2(j, i, t)$ должна обязательно возра-



стать, но этот рост маскируется экспериментальными ошибками, анализ которых и позволил оценить значение скорости V_2 .

Порог (вероятно, даже полоса) срабатывания КУ в среднем должен быть одинаков для всей цепочки j и равен $N_j = \sum_i N2(j, i, t = \tau_i) / n_j$, где суммирование осуществляется по всем эпохам цепочки j , количество которых равно n_j . Длительность каждой эпохи i легко рассчитать с помощью соотношения $\tau_i = (N_j - N2(j, i, t_i)) / V_2$. Результаты расчетов с использованием вышеуказанных значений V_1 и V_2 приведены в табл. 1, $k = 5$. Из сравнения данных для $k = 5$ и $k = 2$ следует, что согласие с экспериментальными данными можно признать в общем удовлетворительным, если учесть случайный характер смены одной эпохи на другую.

Полученные результаты необходимо достаточно подробно прокомментировать.

1. Для изменения скорости V_1 в случае $j = 3, 4$ нужны очень весомые физические причины, которые могли бы повлиять на Землю, т. е. на большую планету, а не «воздушный шарик». Поиски физических причин увеличения V_1 от $0,02/t_0$ до $0,04/t_0$ привели к следующим результатам:

малозначимой причиной представляется нагрев ядром окружающих его слоев мантии до состояния активного вещества КУ. Оценки показывают, что для наблюдаемого эффекта ($V_1 = 0,04/t_0$) нужно вовлечь в активное состояние такую массу мантии, которая должна быть сравнима с массой ядра. Но достаточного нагрева такой массы мантии не произошло, так как потепление климата и таяние льдов Арктики, Антарктиды, Гренландии не имеют пока признаков необратимых процессов. Интересно отметить, что в случае накопления энергии ядром не в квантовом виде, а в виде классической тепловой энергии ядро в эру кайнозоя стало бы газообразным телом, возможно, даже перегретым под высоким давлением со всеми вытекающими отсюда последствиями. Отсутствие последних в достаточно явном виде позволяет заключить, что именно квантовые свойства ядра и всей Земли [2] ограждают человечество от различных негативных явлений;

основной причиной служит, вероятно, электромагнитное взаимодействие токов вращения активного вещества КУ, которое является про-

водящим [5]. В течение всей геологической истории Земли до эпохи $i = 11$ в области уровня $E1$ КУ накапливались квазичастицы в виде этих токов, попавших туда в результате квантовых переходов с уровня $E2$ и в процессе рождения и развития ядра. Во времена эпохи $i = 11$ концентрация токов с энергиями $E1$ достигла порогового значения, при котором стало вероятным их объединение путем электромагнитного взаимодействия при определенных начальных условиях, подобных условиям электромагнитного взаимодействия витков с током в соленоиде. В результате ряда таких объединений увеличивается энергия токов вращения в рамках ширины уровня $E1$, и, наконец, после объединения наиболее энергичных токов у них появляется возможность перейти на уровень $E2$. Такой эффект имеет пороговый характер, который подтверждается экспериментально, так как $\lambda_i(t)$ (табл. 1, $k = 3$) возрастает приблизительно в пять раз при переходе от $i = 10$ к $i = 14$. Такого роста не наблюдается для цепочек $j = 1$ и $j = 2$, в течение которых электромагнитный способ накачки еще не стал достаточно эффективным, и $j = 4$, когда был достигнут возможный максимум роста функции $\lambda_i(t)$ во время неогена и плейстоцена (табл. 1, $k = 3$).

2. Рассмотрим цепочку $j = 4$. Она уникальна по своему виду, так как в ней находится эпоха $i = 16$, длительность которой минимальна среди соседних эпох $i = 15, 17$ (табл. 1, $k = 2$). Такого минимума больше нет в других j , которые в среднем удовлетворительно объяснены с помощью концепции, предложенной в настоящей работе. Для объяснения наблюдаемого единственного минимума в случае $i = 16$ в концепции настоящей работы необходимо предусмотреть возможность изменения хода времени для отдельной эпохи, что не может быть физически обосновано. Поэтому было сделано заключение о том, что суммарное время двух эпох ($20t_0$) разделено между эпохами $i = 15$ и $i = 16$ ошибочно, и эти две эпохи следует анализировать в рамках единого неогенового периода с длительностью $20t_0$ [8]. Интересно отметить аналогию по длительности неогенового периода и эпохи $i = 17$ с эпохами $i = 11$ и $i = 12$, которые находятся в начале последовательной смены трех эпох ($i = 12, 13, 14$). Принимая во внимание очень вероятную цикличность процессов, происходящих в природе,

можно предположить, что новейшая эпоха будет иметь длительность $10t_0$, и затем проверить это предположение с помощью концепции настоящей работы. Результаты этой проверки в общем удовлетворительны (табл. 1, $i = 18$).

Электромагнитный механизм накачки — пороговый, он начался с $i = 11$ и должен завершиться пороговым образом в будущем во время той эпохи, когда концентрация токов вращения на уровне $E1$ упадет ниже критической. Переход к этой эпохе может быть уникальным по своему энерговыделению, и в результате величина λ_i уменьшится до значений существенно меньших, чем до перехода, а это будет указывать на существенное сокращение запасов квантовой энергии в ядре. Такую возможность ядро Земли реализовало во время перехода от $i = 14$ к неогеновому периоду, но, к сожалению, за время этого периода функция λ_i опять возросла до значений ($i = 17$), которые наблюдались до перехода ($i = 13, 14$). Это служит экспериментальным подтверждением того, что между населенными пунктами $N1$ и $N2$ наступило динамическое равновесие без нарушения условий генерации упругих волн КУ.

Выполненный в настоящей работе анализ показывает, следующее:

1. Общепринятое деление эпох на эры несколько отличается от предсказаний квантово-механической концепции, согласно которой аналогом определенной эры является соответствующая цепочка j . В настоящее время на Земле протекает не эра кайнозоя, а новая эра, которая началась в эпоху миоцена ($i = 15$), а эра кайнозоя началась в начале нижнемеловой эпохи ($i = 10$) и завершилась в эпоху олигоцена ($i = 14$). Указанные различия имеют только формальный характер и не являются физически значимыми, а следовательно, достаточно интересными.

2. Физически значимым представляется нижеследующий вывод, подтверждаемый экспериментально, о том, что во время цепочек $j = 3, 4$ ядро Земли находилось в состоянии перегруженности как квантовой, так и классической (тепловой) энергией. Это привело к очевидным сокращению в среднем длительности эпох и увеличению энерговыделения при их смене для цепочек $j = 3, 4$ по сравнению с предыдущими $j = 1, 2$. Указанные различия между $j = 1, 2$ и $j = 3,$

4 показывают, что в новейшую эпоху человечеству следует ожидать увеличения частоты и мощности катализмов:

вулканических процессов вплоть до излияний магмы из разломов коры Земли и кальдер;

сейсмических явлений, а также импульсов электромагнитного излучения и инфразвуковых волн вплоть до перехода от одиночных импульсов к практически стационарному режиму генерации;

климатических аномалий.

3. Для ядра как квантовой системы с колебательными уровнями конденсированного вещества применимо понятие температуры Дебая [5], превышение которой даже в отдельных областях ядра приведет к таким последствиям, какие трудно даже представить. Тем не менее вполне вероятно, что эти последствия человечество имеет возможность наблюдать в настоящее время на примерах Венеры и Марса, чья масса меньше массы Земли и ядра которых нагрелись до температуры выше дебаевской быстрее, чем это было возможно для ядра Земли, а поэтому совершили переход от квантового к классическому пути развития тоже раньше. Различие между Марсом и Венерой состоит лишь в том, что Марс старше Венеры [1] и поэтому к настоящему времени уже успел остыть и представляет собой планету, не имеющую особых перспектив своей эволюции. Отметим, что Марс и Венера не имеют значимой магнитосферы [8] и, следовательно, активных ядер, подобных ядру Земли. Обсуждаемая гипотеза о судьбах Венеры и Марса радикально вероятней предположения о том, что в нужные моменты времени Венера и Марс столкнулись с другими космическими телами, имеющими достаточную массу для того, чтобы прервать нормальный (квантово-механический) ход эволюции ядер этих планет. Анализ геологического летоисчисления Земли показывает, что эволюция Венеры и Марса не могла происходить непредсказуемым образом и принципиально отличаться от эволюции Земли, так как Венера и Марс — ближайшие соседи нашей планеты. Можно обоснованно полагать, что Земля и Венера — это планеты-близнецы, имеющие приблизительно одинаковые условия накачки на единицу массы ядер. Венера лишилась своего активного ядра относительно недавно, если принять во внимание температурные условия на ее



поверхности, атмосферное давление и состав самой атмосферы [3]. Поэтому вполне вероятно, что новейшая эпоха ($i=18$) может оказаться последней в геологической истории Земли, если учесть, что для перехода от квантового к классическому пути развития достаточно локального превышения температуры в ядре выше дебаевской. Если локального превышения не произойдет, тогда следует учесть, что масса ядра Земли должна быть в 1,2 раза больше массы погибшего активного ядра Венеры, так как отношение масс Земли и Венеры приблизительно равно 1,2. Следовательно, Земля достигнет критического состояния Венеры приблизительно через 20 % суммарного времени наиболее опасных цепочек $j = 3,4$, т. е. через $25t_0$ лет. Поэтому можно полагать, что 10–20 миллионов лет запас человечества еще имеет, но эти годы будут не очень комфортабельными по условиям жизни в связи с постоянно возрастающими накоплениями квантовой и теп-

ловой энергии в ядре. Для уменьшения этих накоплений нужны специально разработанные методы отвода энергии из ядра, физические основы которых автор пока предложить не может, хотя интенсивный отвод может стать неисчерпаемым источником энергии для человечества и успокоить сейсмические, вулканические и другие негативные явления на Земле.

За обсуждение результатов работы автор выражает большую благодарность профессорам СПбГПУ:

Заслуженному деятелю науки РФ В.А. Пальмову — за исчерпывающую консультацию в области классической механики;

Заслуженному работнику ВШ РФ И.Н. Топтыгину — за весьма острую, но очень полезную критику по вопросам квантовой механики;

Я.А. Бердникову — за доброжелательность к моей работе как одному из возможных методов познания окружающего нас мира.

Статья поступила в редакцию 28.02.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Космач, В.Ф. Квантовость орбит планет Солнечной системы [Текст] / В.Ф. Космач // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 4.— С. 341–345.
2. Космач, В.Ф. Спин Земли [Текст] / В.Ф. Космач // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 1.— С. 256–262.
3. Таблицы физических величин [Текст]: Справочник / Под ред. академика И.К. Кикоина.— М.: Атомиздат, 1976.— 1006 с.
4. Ландау, Л.Д. Квантовая механика. Нерелятивистская теория [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц.— М.: Физматгиз, 1963.— 704 с.
5. Физический энциклопедический словарь [Текст] / Под ред. А.М. Прохорова.— М.: Советская энциклопедия, 1984.— 944 с.
6. Бабичев, А.П. Физические величины [Текст]: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский [и др].— М.: Энергоатомиздат, 1991.— 1232 с.
7. Мухин, К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Том 1 [Текст] / К.Н. Мухин.— М.: Атомиздат, 1974.— 584 с.
8. Советский энциклопедический справочник [Текст] / Под ред. А.М. Прохорова.— М.: Советская энциклопедия, 1989.— 1632 с.

УДК 621.515

К.А. Кабалык, В. Крыллович

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА В СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Центробежные компрессоры (ЦК) — энергетические машины, эффективность работы которых во многом зависит от газодинамического совершенства рабочего процесса в проточной части. Применение методов вычислительной

гидродинамики (CFD-Computational Fluid Dynamics) при конструировании ЦК значительно снижает затраты на экспериментальную доводку, стоимость и сроки проектирования. Однако на сегодняшний день расчеты течений в ЦК

с использованием существующих программных комплексов не обладают высокой степенью достоверности [1]. Нет универсальных рекомендаций об оптимальных свойствах математической модели ступени (качество расчетной сетки, модель турбулентности, тип постановки граничных условий и т. д.), обеспечивающих баланс точности и времени счета.

Целями работы, проведенной в рамках научного студенческого обмена между Институтом турбомашин Лодзинского технического университета (ИТ ЛТУ, Польша) и кафедрой КВХТ СПбГПУ, являются:

- 1) расчет радиального распределения угла потока в абсолютном движении на входе в рабочее колесо (РК) ЦК;
- 2) расчет характеристики ступени ЦК;
- 3) сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Описание экспериментального стенда

Объект исследования — экспериментальный стенд DP1.12 лаборатории ИТ ЛТУ, эскиз мериониального сечения которого представлен на рис. 1, а.

Согласно рис. 1, а основными элементами ступени являются: диагональный входной направляющий аппарат (ВНА) (поз. I), связанный с входным патрубком (на схеме не показан); осе-

риальное рабочее колесо полуоткрытого типа (поз. II); безлопаточный диффузор (БЛД) (поз. III) и спиральная камера (поз. IV), соединенная с выходным патрубком. Воздух сбрасывается в помещение лаборатории. Число лопаток ВНА $z_{\text{ВНА}} = 18$. Лопатки постоянного сечения по высоте и имеют возможность поворота как по направлению вращения ротора, так и против него. Угол установки ВНА $\alpha_{y\text{-ВНА}}$, принятый в данной работе, равен 45° , т. е. закрутка потока на входе в РК положительная. Рабочее колесо имеет 23 лопатки, входной угол лопатки на среднем радиусе $\beta_{\text{III,T}} = 39^\circ$, выходной угол $\beta_{\text{L2}} = 90^\circ$, выходной диаметр $D_2 = 330$ мм. Ширина БЛД — постоянная по радиусу: $b_2 = b_4 = 15$ мм. Частота вращения ротора $n = 5500$ об/мин. Основные геометрические параметры ступени в безразмерном виде представлены в табл. 1.

Угол потока α_1 (рис. 1, б) отсчитывается от направления u . Экспериментальные измерения угла α_1 проводятся на расстоянии 29 мм вверх по потоку от входной кромки РК (сечение 1–1). Для проведения измерений используется пятиканальный пирамидальный зонд-угломер (поз. V). Зонд имеет возможность радиального перемещения и соединен с электронной системой обработки данных. Число точек замера по высоте канала — 13, погрешность измерений по данным ИТ ЛТУ составляет $\Delta\alpha_{1\text{эксп}} = 0,1^\circ$.

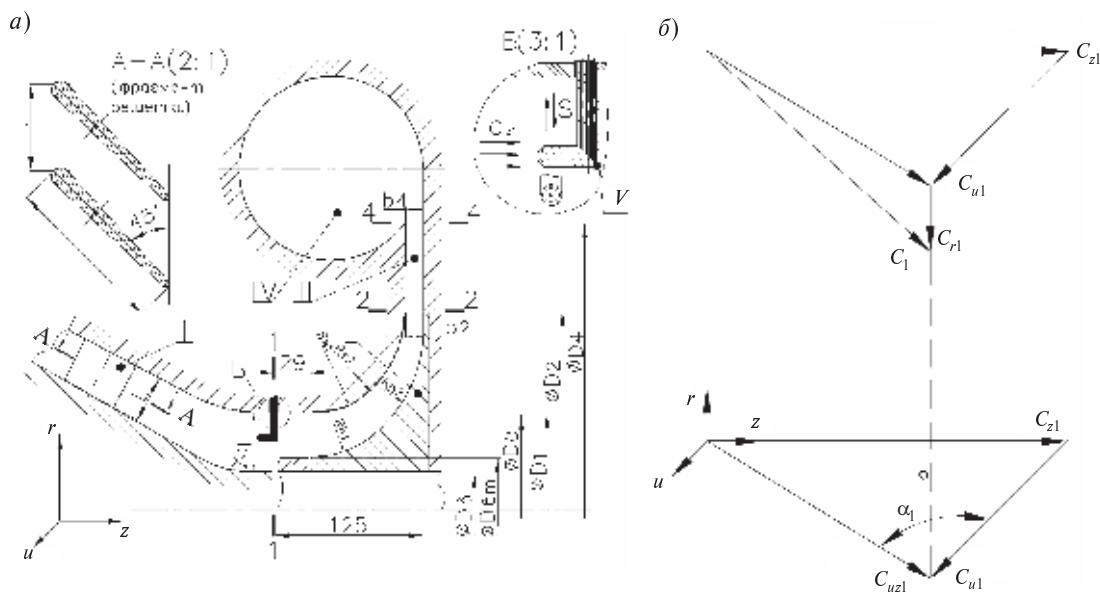


Рис. 1. Эскиз мериониального сечения ступени стенда DP1.12 (а) и треугольник скоростей в сечении 1–1 на произвольном радиусе (б)



Таблица 1

Основные безразмерные геометрические параметры ступени

ВНА			РК					БЛД	
$b, \text{мм}$	L/b	b/t	$D_2, \text{мм}$	D_4/D_2	D_0/D_0	D_1/D_2	b_2/D_2	D_4/D_2	b_4/D_2
46	0,85	1,22	330	0,26	0,53	0,50	0,045	1,44	0,045

Для получения экспериментальной характеристики ступени во входном патрубке измеряются: статическое давление $p_{\text{вх}}$, статическая температура $T_{\text{вх}}$; на выходе из спиральной камеры — статическое давление $p_{\text{вых}}$, давление торможения $p^*_{\text{вых}}$ и статическая температура $T_{\text{вых}}$. Массовый расход \bar{m} измеряется с помощью «насадка Борда» (Borda mouthpiece), установленного на входе в компрессор.

Постановка задачи численного исследования

Моделирование производится в среде программного комплекса Ansys CFX 12.0. Геометрическая модель ступени представлена на рис. 2, а. Расчет ведется для одной лопатки ВНА и РК. Для удобства построения расчетной сетки модель разделена на три блока: ВП (входной патрубок), ВНА, РК. Первые два блока рассчитываются в неподвижной системе координат, блок рабочего колеса — во вращающейся. На границе перехода из одной системы в другую ставится условие фиксированного взаимного расположения сеток РК и ВНА без осреднения параметров по окружной координате (опция «frozen rotor» [3]). На стенках БЛД и на периферии РК задается условие вращения в направлении, обратном вращению колеса, позволяющее сохранить неподвижность стенки в абсолютной системе координат [3]. Выходное устройство в модель не включено для снижения требований к вычислительным ресурсам.

Границные условия. На входной границе задаются значения полного давления $p^*_{\text{вх}}$ и полной температуры $T^*_{\text{вх}}$, на выходной — значение массового расхода $\bar{m}_{\text{вых}}$ через сектор рабочей лопатки. Для расчетного режима работы машины значения вышеуказанных параметров соответственно равны: $p^*_{\text{вх}} = 0,1 \text{ МПа}$, $T^*_{\text{вх}} = 296 \text{ К}$, $\bar{m}_{\text{вых}} = 0,018 \text{ кг/с}$. На втулочной¹, периферий-

ной и лопаточных поверхностях в качестве граничного условия задается нулевое значение скорости на стенке. На поверхностях, ограничивающих расчетную область в окружном направлении, задается условие периодичности.

Рабочее тело — воздух. Ставится стационарная задача, протечки в зазоре между основным диском РК и корпусом не моделируются.

Отработка цифровой модели:
результаты и анализ

Цифровая модель ступени отрабатывалась для расчетного режима работы компрессора ($\Phi_p = 0,043$) и включала следующие этапы: достижение сеточной независимости, исследование влияния модели турбулентности и интенсивности турбулентности на входной границе на результаты расчета.

Выбор расчетной сетки. Построение расчетной сетки блока входного патрубка производилось с использованием генератора ICEM CFD, сетки блоков ВНА и РБ строились в приложении программного комплекса ANSYS CFX — CFX Turbogrid. На начальной стадии построения модели было создано пять многоблочных структурированных сеток следующих плотностей: 260000, 500000, 880000, 1270000, 2000000 узлов. Максимальное значение параметра y^+ для всех вариантов сеток не превышало 20. При проведении этой серии расчетов единственным варьируемым параметром был размер расчетной сетки. Условием достижения сеточной независимости было поставлено стремление значений выходного полного давления p^*_4 и суммарного крутящего момента на лопатках ВНА $M_{\text{кРВНА}}$ и РК $M_{\text{кРРК}}$ к постоянной величине приросте числа узлов. В итоге для дальнейших расчетов был выбран третий вариант сетки.

Выбор модели турбулентности. Последующим этапом создания численной модели стал выбор модели турбулентности ($k - \varepsilon$, $k - \omega$, SST*). Рас-

¹ Понятие «втулочная» использовано условно для обозначения поверхности, ограничивающей расчетную область в нижней ее части

* SST — (от англ. Shear Stress Transport) модель переноса касательных напряжений турбулентности

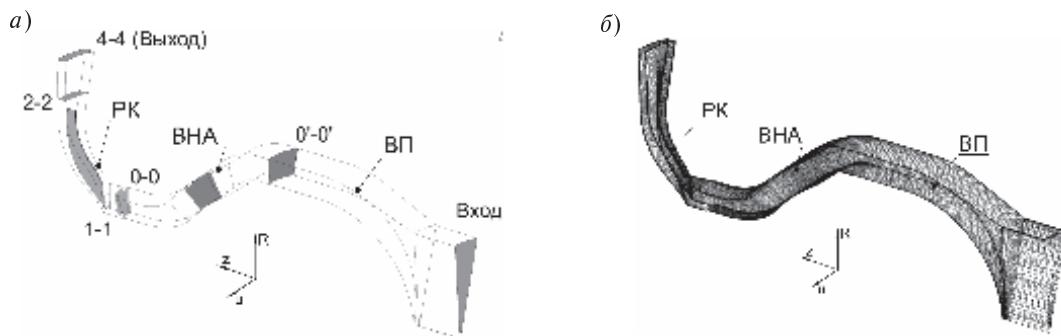


Рис. 2. Расчетная модель ступени (а) и окончательная расчетная сетка (б)

считанные распределения угла потока α_1 по высоте канала сравнивались с экспериментальным. Было выявлено низкое качество разрешения сетки в областях ограничивающих поверхностей, а также вблизи лопаток ВНА и РК (ни одна из моделей не давала удовлетворительного соответствия экспериментальным результатам). Потребовалось изменение сетки, которое включало уменьшение высоты первого «пристенного» элемента в среднем с 0,035 до 0,013 мм вместе с понижением величины коэффициента сгущения у стенок с 1,8 до 1,3. Величина y^+ (безразмерное расстояние от стенок до первого сеточного узла) для окончательной сетки, изображенной на рис. 2, б, не превышает пяти.

Коррекция сетки привела к увеличению числа узлов до 1365000 и позволила приблизить расчетные результаты к данным измерений как качественно, так и количественно, что иллюстрирует рис. 3, а. По оси ординат отложена безразмерная высота канала $\bar{x} = x_i / l$, где $x_i = 0,5(D_i - D_{\text{вт}})$ — текущая высота, $l = 0,5(D_0 - D_{\text{вт}})$ — высота канала перед входной кромкой РК. Кривая, отвечающая случаю SST_880, соответствующая старой сетке и модели турбулентности SST, лежит далеко от экспериментальной, в то время как распределение, полученное для той же модели при более точной дискретизации (кривая SST), лежит гораздо ближе к опытному (расхождение составляет 2–3 градуса). Модель турбулентности $k - \omega$ практически повторяет результат расчета по SST, модель $k - \varepsilon$ завышает значения α_1 в среднем на 5–8 градусов и дает существенную качественную погрешность. Опираясь на результаты работы [2], где автор отмечает более благоприятное соответствие эксперименту характеристики РК, рассчитанной по SST, было решено для дальнейших расчетов использовать модель турбулентности SST.

Выбор интенсивности входной турбулентности. Финальным шагом в отработке цифровой модели стало варьирование интенсивности турбулентности на входной границе. Согласно [4] ($k - \omega$)-модели, к которым относится SST, чувствительны к уровню входной турбулентности и требуют проверки влияния этого параметра на результаты расчета. По определению интенсивность турбулентности

$$I = \frac{u'}{U}, \quad (1)$$

где $u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)}$ — среднеквадратичная пульсация скорости в точке контрольного объема за период осреднения; $U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$ — средняя скорость потока в той же точке. Интерфейс программного комплекса Ansys CFX позволяет задать параметр I совместно с отношением турбулентной μ_t и молекулярной μ вязкостей следующим образом: при степени турбулентности $I = 1\%$ будет $\frac{\mu_t}{\mu} = 1$; при $I = 5\%$ — $\frac{\mu_t}{\mu} = 10$; при $I = 10\%$ — $\frac{\mu_t}{\mu} = 100$.

В данной работе изменение уровня турбулентности на входной границе описанным выше методом не привело к изменению расчетного распределения угла потока α_1 . Окончательный выбор производился на основе оценки величины I по полуэмпирической зависимости, приведенной в [5]:

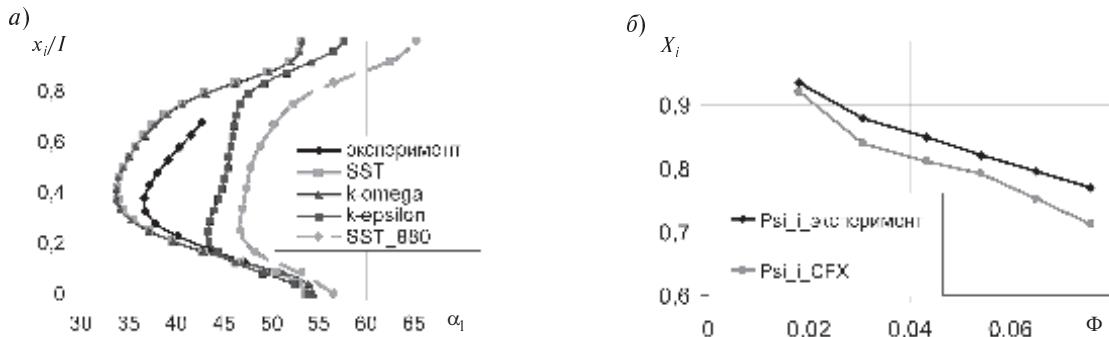


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости: *а* — радиальные распределения угла α_1 ($\Phi_p = 0,043$); *б* — безразмерные напорные характеристики ступени

$$I = 0,16 \text{Re}_{d_{\text{bx}}}^{-\frac{1}{8}}, \quad (2)$$

где $\text{Re}_{d_{\text{bx}}} = \frac{c_{\text{bx}} d_{\text{bx}} \rho_{\text{bx}}}{\mu_{\text{bx}}}$ — число Рейнольдса; $c_{\text{bx}} =$

$= \frac{\bar{m}_p}{\rho_{\text{bx}} f_{\text{bx}}}$ — средняя скорость потока; $\bar{m}_p = 0,417 \text{ кг/с}$ — массовый расход на расчетном режиме работы; ρ_{bx} — плотность рабочего тела; $f_{\text{bx}} = 0,072 \text{ м}^2$ — площадь входного сечения; μ_{bx} — динамическая вязкость. Всасывающая прямая труба стенда DP1.12, подводящая воздух к входному патрубку, имеет диаметр $d_{\text{bx}} = 302 \text{ мм}$. Вязкость и плотность воздуха соответствуют состоянию при параметрах, указанных в табл. 2, и соответственно равны $\mu_{\text{bx}} = 18,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\rho_{\text{bx}} = 1,183 \text{ кг/м}^3$. Проводя алгебраические вычисления, получим $I = 0,038$, или $I = 3,8 \%$. Поэтому дальнейшие расчеты проводились при значении $I = 5 \%$ как наиболее близком к оцененному по формуле (2).

Свойства отработанной цифровой модели ступени сведены в табл. 2.

Результаты моделирования напорной характеристики ступени

Завершающая часть исследования — применение численной модели для расчета напорной характеристики ступени. Работа машины в области малых расходов, где влияние нестационарности существенно, не моделировалась. Безразмерные расчетная и экспериментальная характеристики представлены на рис. 3, б. Заметим, что последняя была получена при испытании компрессора в компоновке с осевым ВНА, поэтому целесообразнее качественное сравнение, нежели количественное.

По оси абсцисс отложен условный коэффициент расхода Φ , по оси ординат — коэффициент внутреннего напора Ψ_i . При расчете параметров использована методика кафедры КВХТ СПбГПУ, изложенная в [2].

В итоге работы получены следующие результаты:

разработана численная модель ступени центробежного компрессора, оснащенного поворотным диагональным ВНА;

установлены требования к качеству расчетной сетки, достаточному для моделирования кинематики течения перед РК с погрешностью 5–

Таблица 2

Основные свойства численной модели ступени ЦК

Блок	Число узлов сетки	Тип сетки	Модель турб-стн	Испеч. турб-стн
НП	81190	Н-сетка		
ННА	670996	H/J/C/L+O-блок вокруг лопатки	SST	
РК	612572	H/J/C/L+O-блок вокруг лопатки		5%

7 % относительно эксперимента на расчетном режиме работы компрессора;

выявлены модели турбулентности, применимые для адекватного описания течения в рамках поставленной задачи;

влияния интенсивности турбулентности на входной границе на результаты расчета не обнаружено;

применение модели ступени для расчета напорной характеристики ступени показало удовлетворительное качественное соответствие экспериментальным данным.

Выражаем благодарность коллективу ИТ ЛТУ и кафедре КВХТ СПбГПУ за организацию и помочь в проведении исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галеркин, Ю.Б. Турбокомпрессоры [Текст] / Ю.Б. Галеркин. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.
2. Гамбургер, Д.М. Численное моделирование течения вязкого газа в центробежной компрессорной ступени: методика и результаты [Текст]: дис. ... канд. тех. наук. / Д. М. Гамбургер / СПбГПУ. — СПб., 2009.
3. ANSYS Inc., ANSYS CFX 12.0 «Users Manual» [Text]. — 2009.
4. [Электронный ресурс] / http://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model
5. [Электронный ресурс] / http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity

УДК 69.07

Д.Н. Смазнов

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЕК ЗАМКНУТОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Снижение расхода металла в строительстве достигается применением тонкостенных холодногнутых профилей. Их использование в элементах конструкций позволяет сэкономить 10–12 % металла и значительно снизить трудоемкость изготовления и монтажа. Растет и доля таких профилей из высокопрочной стали. Высокопрочные стали обычно имеют маленькую или вообще не имеют площадки текучести, и их пластичность довольна низкая, что существенно отличает их от обычной стали.

Проведенный анализ отечественных исследований [3, 6] показал, что теория для расчета тонкостенных конструкций вполне разработана, и трудно ожидать принципиально новых теоретических построений. Большинство прикладных, практически важных задач относится к классу краевых задач, аналитическое решение которых в силу различных обстоятельств (нерегулярность геометрии, сложность граничных условий) найти невозможно. В этой связи средством для получения приемлемых по точности

и затратам времени результатов при решении практических задач являются численные методы. Несмотря на то, что в зарубежных публикациях этому вопросуделено большее внимание, тем не менее отсутствует ряд существенных рекомендаций для расчета замкнутых профилей, к тому же существенно занижается пластичность профилей при расчете на устойчивость [9].

Проведенный анализ зарубежных исследований [4, 5, 8] показал необходимость разработки отечественной практической методики расчета. В зарубежных исследованиях наиболее часто рассматривается поведение С и Z профилей, несущая способность которых повышается за счет применения высокопрочной стали, а экономия — за счет уменьшения толщины до 0,5–0,8 мм.

Все вышеизложенное говорит об актуальности рассматриваемой проблемы. Чтобы сократить уровень отставания от зарубежных ученых и выйти вперед, нужно отойти от рассмотрения открытых профилей и сосредоточиться на иссле-



довании замкнутых профилей и деформации сдвига, установлении меры депланации с углом закручивания, на рассмотрении вопроса сдвиговых усилий и напряжений, на проведении аналогий для разработки адекватных моделей холодногнутых профилей из высокопрочной стали с толщинами менее 1,0 мм.

Статья посвящена исследованию работы тонкостенных профилей с применением методов численного анализа. Рассматривается решение задач деформирования профилей под действием сжатия. Решены задачи линейного деформирования профилей постоянной жесткости с учетом и без учета сдвига.

Для сравнения и подтверждения достоверности полученных решений приведены результаты экспериментов применительно к условиям тех же задач [10].

В результате определено влияние критической разрушающей нагрузки на перемещения и угол закручивания, а также выявлены места концентрации напряжений. Использование полученных результатов при расчетах позволяет повысить точность рассчитываемых профилей, а при необходимости — придавать им форму, отличающуюся от существующих.

Предлагается создание нового типа профиля (с отгибами полок наружу) изменением высоты стенки и уменьшенной толщины, чтобы была технологическая возможность объединения двух профилей в замкнутое симметричное коробчатое сечение. Профили стыкуются между собой с помощью самонарезающихся винтов. При этом расстояния между соединениями профилей не должны превышать 300 мм для сжатых элементов. Исследована работа стоек коробчатого сечения, состоящих из двух спаренных профилей (рис. 1). Размеры профилей — 40×40 мм, толщина — 0,6 мм, длина стоек — 450 и 900 мм. Стойки коробчатого сечения используются при строительстве ангаров, зданий промышленного комплекса и имеют предпосылки для более частого и широкого применения из-за высокой по сравнению с профилями открытого сечения несущей способности.

Фактически в расчете рассматриваются три составляющие:

распределение напряжений по высоте профиля;

деформации;

форму потери устойчивости.

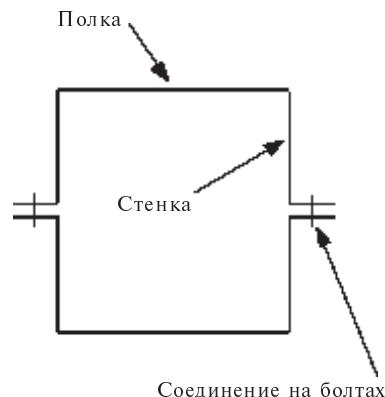


Рис. 1. Общий вид поперечного сечения исследуемой стойки

При нахождении распределения напряжений используется метод конечных элементов (МКЭ). Принцип действия МКЭ применительно к оболочечным схемам: модель разбивают на узлы и конечные элементы, при этом каждый узел имеет 6 степеней свободы. Всю нагрузку также сводят к шести компонентам для каждого узла, соответствующим шести степеням свободы; составляют матрицу жесткости; решают глобальную систему дифференциальных уравнений, в результате чего находят перемещения по 6 направлениям для каждого узла. После этого происходит переход к эквивалентным напряжениям в каждой точке элемента-пластины по четвертой теории прочности.

Анализ напряженного состояния и распределения напряжений позволил охарактеризовать взаимосвязь величины перемещений точек профиля и нагрузки наружного контура. Выявлено, что для замкнутого сечения при условии сплошного сопряжения можно производить расчет на большие нагрузки, чем те, что приводятся в рекомендациях [2, 7] по проектированию для составных сечений.

Подтверждено соответствие деформационных характеристик угловой зоны профиля аналитической модели (рис. 2). Показано, что уровень напряжений на наружном контуре не превышает 10 %, а на внутреннем контуре составляет 25 %. Следовательно, наружный контур разгружается за счет действия торцевых сил, а внутренний нагружается дополнительно.

Перейдем к формам потери устойчивости. Обычно в тонкостенных стальных профилях имеет место одна из четырех основных форм по-

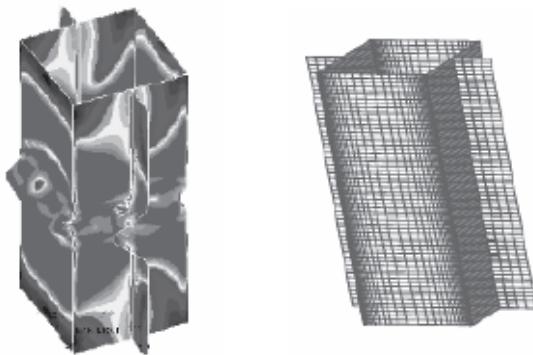


Рис. 2. Деформированная схема для профиля длиной 450 мм

тери устойчивости: местная; потеря устойчивости формы поперечного сечения; общая; крутильная. Возникновение одной из форм зависит от длины, однако указанные формы могут возникнуть и одновременно. В замкнутых составных стойках из П-образных профилей вероятнее всего произойдет местная или общая потеря устойчивости либо возникнет их одновременное проявление, крутильная же потеря устойчивости маловероятна. Но для элементов, изготовленных из очень тонкого (меньше чем 1 мм) стального листа, может возникнуть крутильная форма потери устойчивости, которая будет причиной отказа работы сооружения.

При рассмотрении задачи устойчивости центрально сжатых стоек было установлено, что при достижении сжимающей силой некоторого значения первоначально прямолинейная форма равновесия становится неустойчивой. Наряду с прямолинейной формой равновесия становятся возможными и бесчисленные изгибные фор-

мы равновесия: изгиб происходит в плоскости наименьшей жесткости.

При применении оболочечных моделей для исследования на устойчивость необходимо делать несколько расчетов с разными размерностями сеток; сетка должна быть достаточно мелкой; количество получаемых форм потери устойчивости должно быть более одной. Решена задача об изменении формы в зонах значительных деформаций (стенка). Показано, что наибольшему искажению формы подверглись модели с уменьшенной толщиной стенки.

Перейдем теперь к рассмотрению деформаций. Исследование предельных возможностей позволило получить функциональную зависимость критической деформации от величины нагрузки с достаточной для практического применения точностью и учетом физико-механических явлений, сопровождающих пластическую деформацию. Из характера деформации в процессе нагружения видно, что при этом возникла некоторая равновесная ее форма, которая, однако, имела локальный характер. Относительно локальных равновесных форм деформаций следует заметить, что для профилей другого типа в процессе нагружения возможно достижение таких форм равновесия, при которых предельная нагрузка может иметь большее значение, чем ранее достигнутая. Характер перемещений представлен на рис. 3. Видно, как в случае предельной нагрузки резко растут перемещения в конструкции. Как видно, наличие тонкой стенки профиля способствует увеличению депланации и потере устойчивости. Следует отметить, что для «толстого» сечения депланация не является определяющим фактором.

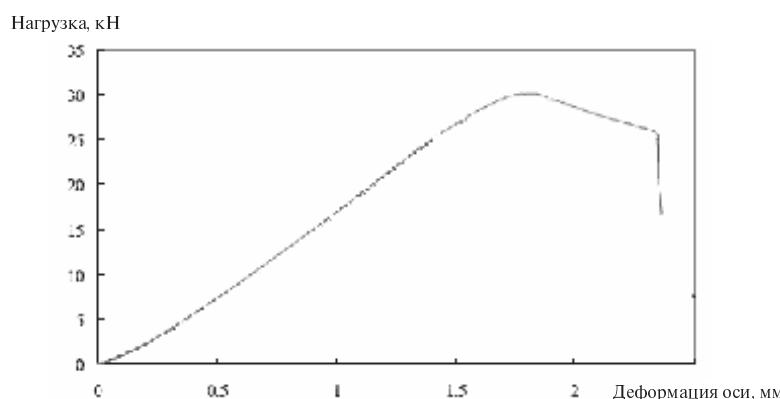


Рис. 3. Зависимость деформаций от нагрузки



Выполнена серия расчетов, позволяющая найти критическую нагрузку. Сравнение результатов численного метода с экспериментальными показало расхождение в 5–10,5 %. Критическая нагрузка при использовании МКЭ для стоек длиной 900 мм составила 31,8 кН; экспериментальная — 28,7 кН; для стоек длиной 450 мм — соответственно 50,2 и 47,6 кН.

В заключение можно сделать следующие выводы:

Конечноэлементные исследования дают правдоподобные результаты и показывают ожидаемую тенденцию. Форма деформации и распределения напряжения согласуется с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования показали, что в среднем разрушающее усилие было мень-

ше, чем теоретическое, которое было определено при местной форме потери устойчивости стойки с учетом эффекта упрочнения стали.

Некоторое расхождение с результатами расчета объясняется тем, что в программе МКЭ геометрические характеристики сечения вычислены точно, а при эксперименте имеются начальные дефекты профилей. Моделирование также показало, что наибольший эффект от отсутствия площадки текучести стали наблюдается на более коротких стойках, где свойства материала оказывают наибольшее влияние на несущую способность.

Для более длинных стоек лимитирующим фактором была местная потеря устойчивости, а свойства материала не оказывали существенного влияния. Местная потеря устойчивости возникала либо у основания стоек, либо в середине в зависимости от граничных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов, И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / И.В. Астахов.— СПб. 2006.
2. Айрумян, Э.Л. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО конструкций «БалтПрофиль» [Текст] / Э.Л. Айрумян.— М., 2004.
3. Власов, В.З. Избранные труды: Т. 2. [Текст] / В.З. Власов.— М., 1963.
4. Yung, D. Suitability of cold-formed rectangular hollow sections for use in plastic design [Текст]: PhD Thesis. D. Yung.— Sydney, 2003.
5. Krymaz, G. Stability Criteria for Thin-Walled Box Columns of High Performance Steel in Axial Compression [Текст]: PhD Thesis / G. Kéymaz / Department of Civil Engineering, Imperial College.— London, 1999.
6. Бейлин, Е.А. Вариант единой теории кручения тонкостенных стержней открытого, замкнутого и частично замкнутого профилей [Текст] / Е.А. Бейлин // Исследования по механике строительных конструкций и материалов: Межвуз. тем. сб.— Л., 1991.— С. 57–74.
7. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. [Текст].
8. Demao Yang. Compression stability of high strength steel sections with low strain-hardening [Текст] / Yang Demao.— School of Civil and Mining Engineering University of Sydney.— 2003.
9. Юрченко, В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде SCAD Office [Текст] / В.В. Юрченко // Инженерно-строительный журнал.— 2010. № 8.— С. 38–46.
10. Смазнов, Д.Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали [Текст] / Д.Н. Смазнов // Инженерно-строительный журнал.— 2009.— № 3.

УДК 621:541.182.6

Ю.Г. Барабанищиков, С.Г. Чулкин

ТРЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ПОРТЛАНД-ЦЕМЕНТА

При бетонировании строительных объектов подача бетонной смеси в блок осуществляется чаще всего перекачиванием по трубопроводу

с помощью бетононасоса. По соображениям его безотказной работы к бетонной смеси предъявляются жесткие требования в отношении ее рео-

логических свойств. Однако не менее важное значение имеет также характер трения смеси по стенкам трубопровода.

Известно, что при скольжении по твердой поверхности дисперсные системы становятся реологически неоднородными. Как было установлено Д.М. Толстым [1], при касательных напряжениях, не превышающих предел текучести объемной структуры, имеет место граничное приостановленное скольжение, когда структура скользит по подкладке как единое целое. Если касательные напряжения приближаются к пределу текучести дисперсной системы, то происходит течение в ее слоях, ближайших к поверхности.

При машинном заглаживании поверхности бетонной смеси толщина градиентного слоя составляет от 8 до 48 мм в зависимости от крупности заполнителя [2]. Бетонная смесь при течении по трубопроводу разделяется на две характерные области: пограничный слой и ядро [3]. Пограничный слой, в свою очередь, состоит из тонкого (0,3–0,4 мм) приостановленного слоя цементного теста и слоя раствора толщиной до 10 мм. Ядро имеет состав, несколько отличающийся от исходного в результате перехода части цементного теста в пограничный слой.

Данные публикаций по внешнему трению дисперсных систем весьма разноречивы. В работах [4, 5] показано, что коэффициент трения снижается с ростом влажности. Согласно работе [6] коэффициент трения с увеличением влажности асбестоцементной смеси вначале возрастает, затем уменьшается.

Непостоянство коэффициента трения было замечено еще Кулоном. Позднее многими исследователями установлено монотонное падение коэффициента трения скольжения с ростом нормального давления для различных материалов. Имеются также данные о возрастании этого коэффициента с нагрузкой. В работе [7] для фрикционного контакта керамической массы с металлом получено понижение коэффициента трения с нагрузкой. Согласно работам [8, 9] ячеисто-бетонные и асбестоцементные смеси при трении по металлу подчиняются линейному закону Кулона. Однако И.И. Берней [6] для асбестоцементных смесей с различной влажностью (от 0 до 54 %) получил снижение коэффициента трения по стали на 10–15 % при изменении нормального давления от 0,2 до 2 МПа.

С.Н. Алексеев [10] указывает на линейную зависимость давления от длины прямой трубы бетононасоса и, следовательно, независимость силы трения от давления, или, что то же самое, равенство нулю коэффициента трения, объясняя это тем, что процесс перемещения бетонной смеси связан с внутренним трением в тонком пристенном слое, играющем роль смазки. Для равноподвижных бетонных смесей увеличение расхода цемента (Π) приводит к росту сопротивления. Если же сохранять постоянным водоцементное отношение (B/Π), то сопротивление перемещению снижается с увеличением расхода цемента. Увеличение B/Π (при $\Pi = \text{const}$) резко снижает силу трения.

Согласно данным испытаний цементно-песчаных растворов и бетонных смесей [4] коэффициент трения уменьшается с повышением относительного водосодержания в пределах, характерных для рабочих составов этих материалов.

Цель нашей работы — установить закономерности трения по металлической поверхности теста и растворной смеси на основе портланд-цемента.

Методика испытания. Испытания проводились по схеме трения «кольцо по кольцу». Конструкция трибометра приведена на рис. 1. Поверхности трения находятся в постоянном контакте.

Образец пасты 2 помещается в цилиндрический корпус 1, выполненный из оргстекла, и приводится во вращение электродвигателем постоянного тока 12. Частота вращения регулируется ступенчато редуктором 13 и плавно изменением напряжения, подаваемого на двигатель. Поверхность образца ДС приводится во фрикционный контакт с контртелом 4, представляющим собой плоское металлическое кольцо толщиной 0,5 мм, приклешенное к держателю 3 из оргстекла. Наружный и внутренний диаметры кольца 4 составляют соответственно 60 и 32 мм. Вал держателя располагается в подшипниках 14 соосно с корпусом образца 1 и может свободно перемещаться вдоль вертикальной оси. От вращения держатель 3 удерживается с помощью упругой пластины 9, жестко скрепленной с валом и упирающейся своими концами в упоры 11. При вращении корпуса 1 происходит скольжение испытуемой пасты 2 по поверхности контртела 4. Контртело 4 прижимается к поверхности образца весом перемещающейся части прибора и набора сменных грузов 15. Крутящий момент, передаваемый ползуну 3 за счет трения образца о контртело, регистри-



Рис. 1. Устройство для испытания дисперсных смесей на трение:

1 — вращающийся корпус; 2 — дисперсная смесь; 3 — ползун; 4 — скользящий электрод; 5 — электрод сравнения; 6 — канал для термостатирования; 7 — термопара; 8 — вспомогательные электроды; 9 — упругий элемент силоизмерителя; 10 — тензорезисторы; 11 — упоры; 12 — электродвигатель; 13 — редуктор; 14 — подшипник; 15 — грузы; 16 — скользящий контакт; У — измерительные усилители; Г — гальванометры светолучевого осциллографа

трируется силоизмерителем, состоящим из упругого элемента 9 с наклеенными на него проволочными тензодатчиками 10. Для отвода выделяемой теплоты и поддержания постоянной температуры в контртеле предусмотрен кольцевой канал 6, по которому пропускается термостатирующая жидкость. Температура на поверхности трения измеряется медь-константановым термоэлектрическим преобразователем 7 (термопара), впаянным в контртеле в непосредственной близости от поверхности трения. Электрические сигналы от силоизмерителя и термопары через усилители постоянного тока U_3 , U_4 подаются на гальванометры Γ_3 , Γ_4 светолучевого осциллографа и записываются на диаграммной ленте. Крутящий момент, передаваемый ползуну за счет трения, составляет величину

$$M = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \tau_f r^2 dr, \quad (1)$$

где r_1 и r_2 — внутренний и внешний радиусы кольца контртела. Напряжения трения вычис-

лялись в предположении, что t не зависит от r , по формуле

$$\tau_f = \frac{3M}{2\pi(r_2^3 - r_1^3)}. \quad (2)$$

Показания термометрического силоизмерителя калибровали с помощью пары подвешиваемых через блоки грузов, создающих момент на известном плече.

Контртело 4 используется одновременно в качестве скользящего электрода для электрических измерений. Электродом сравнения служит нижний, неподвижный относительно пасты, электрод 5, по форме и природе металла полностью идентичный рабочему электроду 4. Сигнал с него снимается через скользящий контакт 16. Расстояние h между электродами 4 и 5 составляет 22 мм (но может быть и иным). Через отверстия в боковой стенке корпуса 1 в ДС вводятся при необходимости вспомогательные (неподвижные относительно пасты) электроды 8, представляющие собой стержни диаметром 1 мм из того же металла, что и основные электроды.

Методика электрических измерений. Измерительная схема подключается к клеммам А и К или по выбору к любой другой паре электродов и работает одинаковым образом как в режиме генерации трибо-ЭДС, так и при поляризации электродов от внешнего источника, подключенного к тем же клеммам.

При замкнутых контактах K_1 электромагнитного реле производится измерение напряжения U на нагрузке $R_1 + R_2 + R_3 = (127754 \pm 81)$ Ом. Калибранный сигнал для этого снимается с магазина сопротивлений $R_3 = 9738$ Ом и подается на вход усилителя постоянного тока $U1$ типа Ф7024С/4 с входным сопротивлением (фактическое) около 30 МОм. Одновременно по падению напряжения на образцовом резисторе $R_1 = 192$ Ом с помощью аналогичного усилителя $U2$ (Ф8024С/1) измеряется сила тока в цепи I . При замыкании контактов K_2 и K_3 и, соответственно, размыкании контактов K_1 цепь ячейки трения закорачивается низкоомным сопротивлением $R_{k3} = 0,04\text{--}0,5$ Ом, вход усилителя $U2$ подключается параллельно резистору R_{k3} и производится измерение тока короткого замыкания I_{k3} . При расчете I_{k3} учитывается сопротивление подводящих проводов R_u , составляющее 0,104 Ом. Выходные сигналы усилителей $U1$ и $U2$ подаются на гальванометры светолучевого осциллографа Н145 и записываются на диаграммной ленте. Перед каждым опытом и сразу после него производится калибровка измерительных сигналов, для чего на электроды ячейки (в отсутствие образца ДС) подается образцовое, регулируемое потенциостатом ППТ63 напряжение от нормаль-

ного элемента Вестона. Электрические параметры вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}DC &= U + Ir = UI_{k3}/(I_{k3} - I); \\ r &= \mathcal{E}DC/I_{k3} = U/(I_{k3} - I),\end{aligned}\quad (3)$$

где r — внутреннее сопротивление ячейки трения (сопротивление образца ДС).

Результаты испытаний. Испытывался цементный раствор (ЦР) состава 1:3 на основе портланд-цемента марки 400 Пикалевского завода и строительного песка, который был предварительно отмыт от глинистых и других нежелательных примесей. Водоцементное отношение (В/Ц) варьировалось от 0,30 до 0,50. Скорость скольжения 7,2 см/с. Контртелом служило кольцо из стали 12Х18Н10Т. Результаты испытаний растворной массы через 15 минут с момента затворения приведены на рис. 2. Ход зависимости $\varphi_f(p)$, вначале криволинейный, при достижении определенного давления (обозначим его p_r) становится прямолинейным. При этом наблюдается резкий перелом графика. В точке перелома происходит скачкообразное увеличение тангенса угла наклона (коэффициент трения). Повышение В/Ц раствора уменьшает силу трения и сдвигает точку перелома в сторону возрастания нормального давления. При давлении выше критической величины p_r графики имеют практически одинаковый наклон.

Зависимость $\varphi_f(p)$ характеризуется гистерезисом (рис. 2, б). Наличие перелома кривой обратного хода и двух ее участков, подобных соответствующим участкам кривой нагружения, говорит об обратимости изменений, происходящих в пасте при давлении p_r .

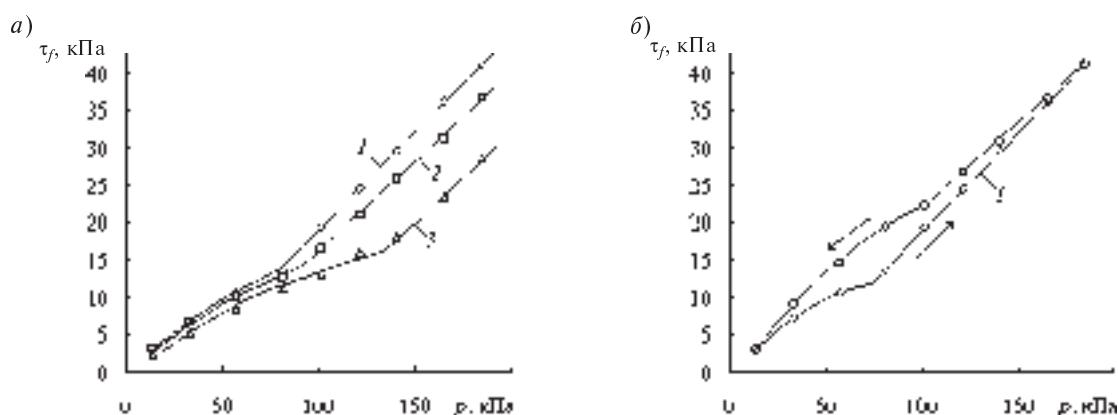


Рис. 2. Влияние нормального давления на трение цементного раствора по стали с увеличением нагрузки (а), а также при прямом и обратном ходе нагружения (б).
В/Ц: 0,30 (1); 0,40 (2) и 0,50 (3)



Рис. 3. Влияние нормального давления на трение цементного теста с В/Ц, равным 0,20 (а) и 0,22 (б) в возрасте 7(1), 23 (4), 90 (2), 115 (3 и 5), 375 (6) минут

Испытания цементного теста при тех же условиях подтвердили наличие изменений в характере трения при нормальном давлении, превышающем критическое значение p_r (рис. 3). Однако такие изменения наблюдаются до начала схватывания цемента (105 минут), причем различия в характере кривых и величинах напряжений трения через 7 и через 90 минут после затворения очень незначительные (кривые 1 и 2). Более существенные отличия наблюдаются спустя 10 минут после начала схватывания — сила трения заметно возрастает, а зависимость $\phi_f(p)$ практически становится линейной (кривая 3). Как видно из рис. 3, б, в процессе схватывания и начинающегося твердения сила трения постепенно растет. Близкий к линейному характер трения сохраняется и после наступления конца схватывания (кривая 6).

Влияние В/Ц на трение цементного теста и раствора демонстрирует рис. 4. Зависимость удельной силы трения от В/Ц имеет максимум при $W/C = 0,20$ (кривая 1). По-видимому, анало-

гичный характер зависимости ϕ_f от В/Ц имеет и цементный раствор (кривая 2), однако подготовить и испытать растворную массу с $W/C < 0,30$ не удалось из-за отсутствия связности.

Анализ результатов. Криволинейные участки графиков на рис. 2 расположены довольно близко друг от друга. Из этого следует близость условий на фрикционном контакте. Согласно опубликованным данным о расслоении бетонных и растворных смесей с образованием разжиженного пристенного слоя, в котором локализуются деформации сдвига, можно предполагать, что такие градиентные слои в рассматриваемых случаях (при различных В/Ц) имеют меньшие отличия по консистенции, чем основная масса образцов. Уменьшение угла наклона (коэффициентов трения) на криволинейных участках с ростом нормального давления свидетельствует об уменьшении доли пристенного скольжения и увеличении доли внутреннего трения в общем сопротивлении сдвига. Это объясняется независимостью вязкостного течения от нормальной

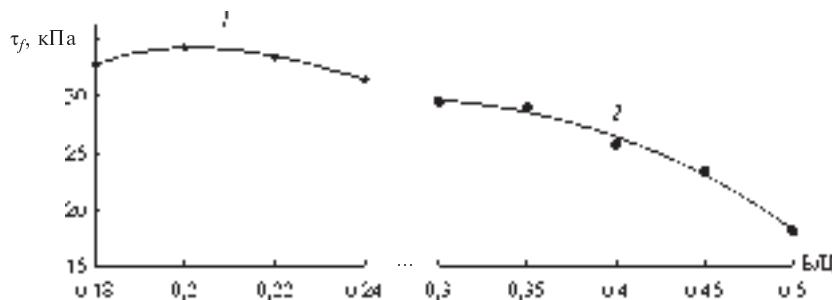


Рис. 4. Влияние водоцементного отношения на трение цементного раствора (1) и цементного теста (2) в возрасте 15 минут по стали при нормальном давлении 141 кПа

силы. При достижении нормальным давлением критического значения p_r , резко изменяется механизм сопротивления трению, что отражается на зависимости $\tau_f(p)$ — она становится линейной, характерной для твердого тела, скользящего по поверхности без внутренних сдвигов. Такой переход пластичной пасты в твердообразное состояние можно объяснить следующим образом.

Как известно, в коагуляционных структурах различают два уровня взаимного расположения частиц — на расстоянии дальнего δ_1 или ближнего δ_2 энергетического минимума на кривой потенциальной энергии их взаимодействия [11]. Первый уровень соответствует слабым коагуляционным контактам с расположением частиц преимущественно на расстоянии дальнего энергетического минимума ($\delta_1 \approx 10^{-7}$ м) с энергией взаимодействия порядка kT [12]. Второй уровень, при котором наблюдается резкое упрочнение коагуляционной структуры с энергией взаимодействия частиц не менее $10-15 kT$ [13], отвечает преимущественному положению частиц на расстоянии ближнего минимума ($\delta_2 \approx 10^{-9}$ м). В соответствии с этим можно предположить, что под действием нормального давления, вызывающего всестороннее обжатие смеси, имеет место сближение частиц в градиентном слое. При критическом давлении p_r преодолевается энергетический барьер и происходит скачкообразный переход структуры с первого на второй энергетический уровень. Чем больше разбавлена структура (чем больше B/C), тем выше должно быть давление, вызывающее такой переход.

Прямые участки графиков на рис. 1 имеют приблизительно одинаковый угол наклона, из чего следует, что коэффициент трения в данной области не зависит от влажности (от B/C). Вероятно, это связано с тем, что контакт между телами осуществляется через водную прослойку, толщина которой зависит от давления, но не зависит от влажности. В наших опытах по трению керамической массы мы наблюдали линейный характер зависимости $\tau_f(p)$ при низкой (менее 12–14 %) влажности. Сопоставим толщину водных прослоек в керамической массе и цементном те-

сте. При среднем значении удельной поверхности кембрийской глины $44 \text{ m}^2/\text{г}$ и влажности 15 % средняя толщина пленок воды между твердыми частицами составляет около 40 \AA , или 15 молекулярных слоев. В случае цементного теста с $B/C = 0,20$ при удельной поверхности цемента $0,2-0,25 \text{ m}^2/\text{г}$ эта величина имеет порядок 10^4 \AA , или 3600 молекулярных слоев. В отличие от керамической массы, в случае цементного теста или раствора происходит отжатие некоторой части воды на фрикционном контакте и устанавливается равновесная толщина граничной прослойки, детерминированная расклинивающим давлением. Сдвиговые деформации локализованы в пределах этой граничной фазы, что подтверждается высокой плотностью и прочностью цементной структуры при всестороннем обжатии. Цементное тесто (а тем более цементный раствор) при испытаниях выдерживало очень большие нагрузки, не выдавливаясь в зазор между контроллером и корпусом держателя, в то время как керамическая масса выдавливалась из этого зазора при не слишком высоком давлении.

Влияние влажности (B/C) цементных составов на силу трения, по всей вероятности, связано с адгезионной составляющей нормального давления.

Выводы. Процесс трения цементного теста и цементного раствора характеризуется сложной зависимостью силы трения от прижимающей силы. Графики этой зависимости имеют точку перелома, делящую их на два различных по характеру участка. При нормальном давлении p ниже некоторого критического значения p_r наблюдается снижение тангенса угла наклона кривых (коэффициент трения) с ростом давления. При $p > p_r$ характер зависимости силы трения от p становится линейным.

Учет указанного обстоятельства позволит более обосновано назначать параметры режима перекачки и других видов обработки бетонной смеси, благодаря чему будет снижен износ рабочих органов машин, поскольку при $p < p_r$ имеет место течение в объеме градиентного слоя (внешнее трение), а скольжение по контакту замедлено или полностью отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толстой, Д.М. Скольжение жидкостей и дисперсных систем по твердым поверхностям [Текст] / Д.М. Толстой // Сб., посвящ. памяти акад. П.П. Лазарева.— М.: Изд-во АН СССР, 1961.— С. 113–125.
2. Болотный, А.В. Заглаживание бетонных поверхностей : монография [Текст] / А.В. Болотный— Л.: Стройиздат, 1979.— 128 с.
3. Васильев, В.М. Движение бетонной смеси



по трубопроводу [Текст] / В.М. Васильев // Гидротехническое строительство. — 1953. № 7.— С. 25–26.

4. **Блещик, Н.П.** Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакумбетона [Текст]: монография / Н.П. Блещик— Минск: Наука и техника, 1977.— 230 с.

5. **Гура, Г.С.** О приближенном расчете коэффициента трения скольжения твердых тел по грунту [Текст] / Г.С. Гура // Вестник машиностроения.— 1963. № 7.— С. 29–32.

6. **Берней, И.И.** Теория формования асбестоцементных листов и труб [Текст]: монография И.И. Берней— М.: Стройиздат, 1988.— 288 с.

7. **Фадеева, В.С.** Формуемость пластичных дисперсных масс : монография [Текст] / В.С. Фадеева— М.: Госуд. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961.— 128 с.

8. **Валюков, Э.А.** Производство асбестоцементных изделий методом экструзии [Текст]: моногра-

графия / Э.А. Валюков, И.З. Волчек— М.: Стройиздат, 1975.— 112 с.

9. **Дядиченко, А.М.** Учет площади фактического контакта при определении напряжений трения [Текст] / А.М. Дядиченко, В.Х. Лапса // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: Тез. докл. III Всесоюз. симп.— Рига: Изд-во Риж. политех. ин-та, 1979.— С. 158–159.

10. **Алексеев, С.Н.** К расчету сопротивлений в трубах бетононасосов [Текст] / С.Н. Алексеев // Механизация строительства. — 1952. № 1.— С. 8–13.

11. **Дерягин, Б.В.** Теория гетерокоагуляции, взаимодействия и слипания разнородных частиц в растворах электролитов [Текст] / Б.В. Дерягин / / Колл. ж.— 1954. Т. XVI. Вып. 6.— С. 425–438.

12. **Ефремов, И.Ф.** Периодические коллоидные структуры [Текст]: монография / И.Ф. Ефремов— Л.: Химия, 1971.— 192 с.

13. **Зимон, А.Д.** Адгезия пыли и порошков [Текст]: монография / А.Д. Зимон— М.: Химия, 1976.— 436 с.

УДК 621.314.571:51.081(045)

С.К. Лисин, А.И. Федотов

НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В обширной сфере измерений теория оценочного преобразования (восстановления), используемая для извлечения из опытов научной, технической и иной информации, является важнейшим инструментом воспроизведения моделируемых экспериментальных зависимостей. В соответствии с этим есть необходимость создать математические модели универсальных и повторяемых опытов, используя способы, методы и аксиомы теории логики, множеств, статистической обработки. Практически до конца восемнадцатого столетия (до научных работ Лежандра, Гаусса, Лапласа, Бесселя и др.) в теории приближенных вычислений и минимизации не существовало установившихся моделей для исследования систем уравнений, в которых число неизвестных величин меньше числа уравнений, что приводило к получению различных решений при одинаковых экспериментальных данных.

Лишь применение теории вероятностей для решения подобных систем уравнений позволило рассматривать вопрос о минимуме суммы квадратов отклонений отдельных измерений относительно установленного по экспериментальным данным результата, называемого ранее результатом арифметической середины. Применение современных методов теории вероятностей и математической статистики характеризуется взаимодействием с методами приближения, линеаризации, регрессионного анализа, реализуемых с помощью метрик наименьших модулей, наименьших квадратов, наименьших кубов и других методов приближенных вычислений.

При анализе опытов возникает необходимость рассмотрения конечного множества элементов, принимаемых за совокупность значений, или исходов, измеряемой величины. Если элементы некоторого множества объединены по вариантам всех возможных исходов «есть собы-

тие», «нет события», ... , то такое множество называется пространством. При изучении и анализе элементов и исходов отдельных множеств исследователь применяет логическую формализацию для описания опыта, что позволяет упростить и сократить форму записи экспериментальной информации. Представление теоретических зависимостей, используемых для описания свойств ряда технических объектов, с помощью их приближенных моделей имеет место при оценке результатов наблюдений, основанной, например, на применении метода наименьших квадратов, позволяющего минимизировать сумму квадратов отклонений [1].

Для описания наблюдений с учетом влияющих факторов используют линейные и нелинейные многочлены. Если некоторую совокупность x_1, x_2, \dots, x_k наблюдений представить k -мерным вектором X_k , то наблюдения по другим переменным и их преобразования сводятся к расчетным процедурам (линейным комбинациям) векторов. Если векторной форме записи контролируемых переменных соответствуют линейные или нелинейные многочлены относительно параметров (коэффициентов) a_1, a_2, \dots, a_k , то такие функциональные зависимости называются регрессионными. Поэтому понятие регрессии можно отнести к понятию меры линейной связи между коэффициентами и контролируемыми переменными. Регрессионные функции воспроизводят свойства объектов контроля с помощью экспериментальных данных. Метод наименьших квадратов позволяет определить не только отклонения расчетной функции, характеризуемые точками, наименее удаленными от эмпирической траектории, но и вероятные ошибки неизвестных параметров. В рамках конкретных метрологических задач экспериментальные зависимости строятся с целью установления связи между независимыми переменными и неизвестными параметрами функций воспроизведения шкал, профилей, отображения результатов, отклонений опытов [2] и др.

При проведении повторяемых опытов часто возникает необходимость построения системы уравнений, содержащей сравнительно небольшое число неизвестных величин по сравнению с общим числом уравнений. В подобных случаях для применения метода наименьших квадратов исходная система уравнений приводится к нормальному виду в следующем порядке:

в исходные уравнения системы последовательно вводятся мультипликативные коэффициенты первой, второй и т. д. неизвестных;

видоизмененные уравнения суммируются в пределах одноименной по соответствующей неизвестной величине группе уравнений.

Полученная таким образом система, содержащая число уравнений, равное числу неизвестных исходной системы, называется нормальной. Нормальная система уравнений с помощью метода наименьших квадратов позволяет минимизировать отклонения внутри самой системы и определить ошибки неизвестных параметров, т. е. обеспечить вероятное демпфирование их приращений.

В общем виде исследуемый массив экспериментальных данных представим в виде многочлена n -й степени

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_kx^k + \dots + a_nx^n.$$

При анализе любой экспериментальной информации используется известное правило прямого перехода к линейному многочлену:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k + \dots + a_nx_n. \quad (1)$$

Матричная комбинация системы линейных уравнений, подобных (1), записывается в виде

$$Y = AX. \quad (2)$$

Здесь A — матрица коэффициентов системы m линейных уравнений,

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{vmatrix};$$

X — вектор неизвестных параметров системы,

$$X = |x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n|;$$

Y — вектор искомых решений системы,

$$Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_m \end{vmatrix}.$$

В этом случае система уравнений исследуемого объекта, процесса или опыта относительно неизвестных записывается в виде



$$\begin{aligned} y_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n, \\ y_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n, \\ &\dots \\ y_m &= a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Процедуры матричных преобразований становятся особенно полезными при оценке свойств объектов ряда метрологических задач [3]. В подобных случаях общая задача регрессионного анализа — это отображение связи между неизвестными величинами контролируемых переменных, определяемыми по результатам прямых измерений. Приведенные выше системы уравнений построены относительно неизвестных величин в первой степени.

Однако чаще всего неизвестные величины или входят в трансцендентные выражения, или имеют высшие степени. Использование метода наименьших квадратов в подобных случаях приводит к необходимости численного решения систем уравнений. По типу рассматриваемых задач можно выделить два варианта применения нелинейного метода наименьших квадратов: нелинейную аппроксимацию (преобразование исследуемой функции в более простую функцию) и оценивание нелинейных параметров.

Пусть, например, рассматривается задача восстановления функциональной зависимости, теоретическая модель которой имеет вид

$$y = \phi(x, u),$$

где функция $\phi(x, u)$ нелинейно зависит от компонент u_i искомого вектора $u = (u_1, \dots, u_m)$. Предполагается, что при $x = x_i$, $i = 1, \dots, n$, производится экспериментальное измерение y_i со случайной погрешностью ε_i . Тогда справедливы равенства

$$y_i = \phi(x_i, u) + \varepsilon_i,$$

которые можно записать в виде

$$A(u) = Y - \varepsilon. \quad (4)$$

Для рассматриваемой задачи

$$\begin{aligned} A(u) &= (\phi(x_1, u), \dots, \phi(x_n, u))_t, \\ Y &= (y_1, \dots, y_m)_t, \\ \varepsilon &= (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m)_t. \end{aligned}$$

Вектор-функцию $A(u)$ можно рассматривать как нелинейный оператор, действующий из пространства R' в пространство R^n .

К нелинейной задаче восстановления (4) сводятся также: многомерные регрессионные задачи, теоретические модели которых имеют вид $y = \phi(x_1, \dots, x_k, u)$, где x_1, \dots, x_k — регрессоры (независимые переменные), а функция ϕ нелинейно зависит от компонент искомого вектора u ; аналоги нелинейных интегральных уравнений, включая нелинейные интегральные уравнения первого рода.

Пусть компоненты ε_i вектора погрешностей ε имеют одинаковую дисперсию σ^2 и не имеют статистической связи. Определим оценку искомого вектора u нелинейной регрессионной модели (4) равенством

$$\hat{u} = \arg \min \|A(u) - Y\|^2. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае

$$Q(u) = \|A(u) - Y\|^2 = \sum_{i=1}^n (A_i(u) - y_i)^2,$$

где $A_i(u)$ — компонента вектора — функции $A(u)$.

Для нелинейных задач восстановления функционал $Q(u)$ может иметь несколько локальных минимумов или вообще не иметь ни одного. Таким образом, для нелинейных задач восстановления существование и единственность оценки искомой величины приобретает существенное и первостепенное значение как с точки зрения качественного анализа, так и с точки зрения вычисления самой оценки.

Вычисление оценок (5) можно осуществить, используя общие методы минимизации закоопределенных функционалов, например градиентные методы или классический метод Ньютона. Однако для решения экспериментальной задачи (5), учитывая специальный вид минимизируемого функционала $Q(u)$ можно сконструировать специальные вычислительные алгоритмы, более эффективные, чем основанные на общих методах решения экспериментальных задач.

Одним из таких специальных вычислительных методов является итерационный метод Ньютона—Гаусса. Суть метода Ньютона—Гаусса состоит в замене нелинейной задачи метода наименьших квадратов линейной задачей. Пусть мы имеем n уравнений, связывающих результаты измерения y_i , контролируемую переменную x_i и неизвестные параметры модели c_1, c_2, \dots, c_m :

$$Y_i = f(c_1, c_2, \dots, c_m; x_i), \quad i = 1, \dots, n.$$

Параметры c_1, c_2, \dots, c_m находятся из условия минимума функционала

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(y_i - f(c_1, c_2, \dots, c_m; x_i) \right)^2. \quad (6)$$

Выберем некоторое начальное приближение значений оцениваемых параметров $c_1^0, c_2^0, \dots, c_m^0$ и разложим нелинейную функцию $f(c_1, c_2, \dots, c_m; x_i)$ в ряд Тейлора в окрестности выбранной точки, ограничиваясь линейными членами разложения. Исходный функционал Q заменим на функционал Q_1 вида

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n \left(y_i - f(c_1^0, c_2^0, \dots, c_m^0; x_i) - \frac{\partial f}{\partial c_1} \Big|_0 \Delta c_1 - \frac{\partial f}{\partial c_2} \Big|_0 \Delta c_2 - \dots - \frac{\partial f}{\partial c_m} \Big|_0 \Delta c_m \right)^2. \quad (7)$$

В точке минимума частные производные от Q_1 должны обращаться в нуль. Приравняв их нулю, получим систему линейных уравнений относительно приращений параметров $\Delta c_1, \Delta c_2, \dots, \Delta c_m$:

$$\begin{cases} 2 \sum_{i=1}^n \left(y_i - f(c_1^0, c_2^0, \dots, c_m^0; x_i) - \frac{\partial f}{\partial c_1} \Big|_0 \Delta c_1 - \frac{\partial f}{\partial c_2} \Big|_0 \Delta c_2 - \dots - \frac{\partial f}{\partial c_m} \Big|_0 \Delta c_m \right) \frac{\partial f}{\partial c_1} \Big|_0 = 0; \\ \dots \\ 2 \sum_{i=1}^n \left(y_i - f(c_1^0, c_2^0, \dots, c_m^0; x_i) - \frac{\partial f}{\partial c_1} \Big|_0 \Delta c_1 - \frac{\partial f}{\partial c_2} \Big|_0 \Delta c_2 - \dots - \frac{\partial f}{\partial c_m} \Big|_0 \Delta c_m \right) \frac{\partial f}{\partial c_m} \Big|_0 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Простое преобразование приводит (8) к виду

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial c_1} \frac{\partial f}{\partial c_1} \Delta c_1 & \dots & \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial c_1} \frac{\partial f}{\partial c_m} \Delta c_m = \sum_{i=1}^n (y_i - f(c_1^0, c_2^0, \dots, c_m^0; x_i)) \frac{\partial f}{\partial c_1}; \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial c_m} \frac{\partial f}{\partial c_1} \Delta c_1 & \dots & \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial c_m} \frac{\partial f}{\partial c_m} \Delta c_m = \sum_{i=1}^n (y_i - f(c_1^0, c_2^0, \dots, c_m^0; x_i)) \frac{\partial f}{\partial c_m}. \end{cases} \quad (9)$$

Решая систему уравнений (9) методом обратной матрицы, находим приращения параметров $\Delta c_1, \Delta c_2, \dots, \Delta c_m$.

Новыми параметрами будут параметры системы

$$\begin{cases} c_1^{k+1} = c_1^k + \Delta c_1^k; \\ \dots \\ c_m^{k+1} = c_m^k + \Delta c_m^k. \end{cases}$$

Процесс нахождения решения будет сходящимся, если функционалы Q и Q_1 эквивалентны, т. е. имеют общий минимум. Это будет в том случае, когда справедливо разложение функции $f(c_1, c_2, \dots, c_m; x)$ в ряд Тейлора в линейном приближении.

Если начальные приближения заданы не очень близко к истинным значениям параметров, решение может оказаться расходящимся (приращения параметров будут слишком большими). В этом случае итерационный процесс Ньютона—Гаусса удобно заменить процессом Левенберга—Марквардта. Суть метода состоит в замене функционала Q не функционалом Q_1 , а эквивалентным функционалом Q_2 вида

$$Q_2 = Q_1 + a \Delta c_1^2 + b \Delta c_2^2 + \dots,$$

т. е. минимизацией одновременно суммы квадратов отклонений и суммы квадратов приращений с целью «демпфировать» приращения.

Реализация предложенных математических моделей позволяет, с одной стороны, минимизировать отклонения восстанавливаемых по результатам наблюдений функций исследуемых объектов, а с другой стороны, определить погрешности искомых параметров системы с помощью эквивалентных функционалов оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Линник, Ю.В.** Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений [Текст] / Ю.В. Линник.—Л.: Физматгиз, 1962.— 352 с.
2. **Лисин, С.К.** [Текст] / С.К. Лисин, А.И. Федотов // Научно-технические ведомости № 3 СПбГПУ.— 2009.— № 3.— С. 181–184.

3. **Лисин, С.К.** Теория и средства измерений [Текст] / С.К. Лисин, А.И. Федотов.— СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2010.— 260 с.



УДК 532.555.2:627.844-845

В.Л. Снежко

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В НАПОРНОМ ТУННЕЛЕ ПРИ ЧАСТИЧНОМ ЗАКРЫТИИ ЗАТВОРА

По трассе напорного гидротехнического водовода наиболее сложные условия работы возникают в местах расположения затворных камер и ответвлений. Значительное усиление коррозионных и абразивных процессов в этих областях в большинстве случаев обусловлено резким изменением кинематической структуры потока. Зона правильно выполненного сварного шва в условиях нормального симметричного поля скоростей корродирует с умеренной скоростью; тот же шов, но в зоне деформации потока, корродирует со скоростью, во много раз большей. Валец над струей, выходящей из-под затвора, служит источником пульсаций давления, вызывающим колебания затворов.

Известен целый ряд работ ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева, посвященных исследованию гидродинамической нагрузки в пределах затворных камер. Пульсации давления в отдельных точках обтекаемого контура на стенках напорной галереи за затвором изучались Д.И. Куминым. Пульсации суммарной гидродинамической нагрузки, действующей в горизонтальном направлении на верхнюю и нижнюю части плоского затвора, расположенного во входном сечении прямоугольного водовода, были экспериментально изучены А.С. Абелевым [1]. Пульсации давления в пропорциональной части радиально-осевых гидротурбин при частичном открытии кольцевых затворов исследованы в работах Н.И. Зубарева и И.В. Плахоти-на [5]. Колебания плоских затворов под воздей-

ствием гидродинамической нагрузки изучались во ВНИИГИМ имени А.Н. Костякова Петром Евгеньевичем Лысенко [8], под руководством которого автор долгое время выполнял научные исследования.

В процессе работы плоского затвора при равной толщине стенок и покрытия водовода разные его участки подвергаются резко неравномерному воздействию потока. Выявление мест подхода ядра скоростей к стенкам, оценка распределения гидродинамического давления по высоте сечения помогут не только определить наиболее вероятные места разрушения облицовок, но и уточнить нагрузки для выполнения прочностных расчетов и оценки вибрации оболочки.

С этой целью в лаборатории гидравлики Московского государственного университета природообустройства в 2009–2010 годах были выполнены экспериментальные гидравлические исследования водоводов квадратного сечения с углами бокового подвода $\alpha = 30\text{--}150^\circ$ при отсутствии расхода ответвления и маневрировании плоским односторонним затвором в напорном режиме истечения (рис. 1).

Принятые схемы в гидротехнике соответствуют многоярусным водопропускным сооружениям, работающим нижней веткой в случае снижения водоподачи, когда регулирование расхода производят плоским затвором, расположенным вблизи наклонного туннеля. Длины влияния каждого из отдельно взятых местных сопротивлений,

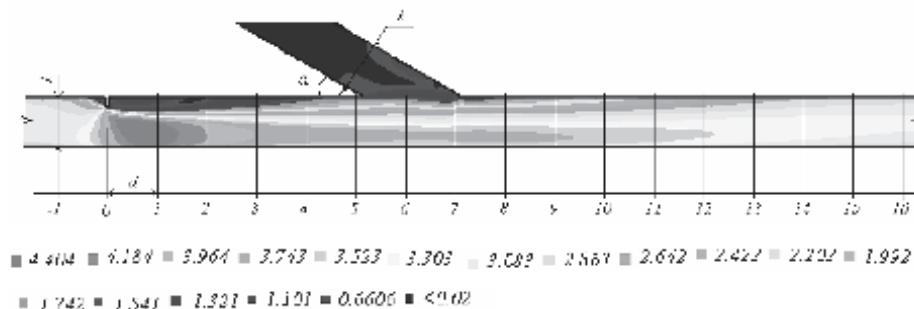


Рис. 1. Распределение скоростей, м/с, для модели с углом наклонной шахты $\alpha = 30^\circ$ при степени закрытия плоского затвора $a/d = 0,2$

выраженные через внутренний диаметр водовода d , составляют: для полностью открытого затвора вверх по течению $l_{вл} = 1,2-2d$ от оси затвора; для регулирующего затвора вниз по течению $l_{вл} = 6-10d$ от оси; для прямого равнопроходного вытяжного тройника в отростках $l_{вл} = 4d$; в магистрали $l_{вл} = 5,5d$ [7]; для бокового отвода приточного тройника $l_{вл} = 10d$ [4]. С гидравлической точки зрения затвор и пустой наклонный туннель (ниша) образуют узел местных сопротивлений, так как расположены на расстоянии $5d$, что меньше длины влияния каждого из отдельно взятых сопротивлений. Дальнейшее сближение затвора и наклонного туннеля при открытии затвора вверх невозможно по технологическим условиям, при разнесении на большие расстояния эффект их взаимного влияния снижается [9].

Модели размещались в гидравлическом лотке, выполнялись из оргстекла толщиной 5 мм, имели внутренний линейный размер 85×85 мм и длину водоводов $76d$. На расстоянии $31d$ от входного оголовка водовода размещался плоский затвор прямоугольного сечения, моделируемый квадратной пластиной толщиной 5 мм с относительным внутренним линейным размером в свету $a/d = 0,1-0,4$. Рабочей жидкостью служила пресная вода, давления по трассе фиксировались с помощью серии пьезометров и вакумметров. Расход воды измерялся в конце гидравлического лотка мерным треугольным водосливом с острой кромкой.

При моделировании напорных потоков основным критерием является подобие сил вязкости, или равенство числа Рейнольдса (Re), натурного и модельного сооружений. Большинство гидротехнических водоводов работают при $Re \approx 10^5$ [6]. В работах А.С. Абелева была доказана автомодельность относительного максимального размаха пульсаций гидродинамической нагрузки, действующей на затвор, для случаев $Re \approx 10^4$. Значения коэффициента Дарси λ и коэффициентов местных гидравлических сопротивлений ξ также являются функциями числа Рейнольдса. Для тройников начало автомодельной зоны соответствует $Re = 1,4 \cdot 10^4$, квадратичная область сопротивления плоских затворов начинается с $Re > 10^4$. На первом этапе исследований было выяснено, обеспечивают ли напоры и расходы установки автомодельную область гидравлических сопротивлений. Для этого по экспериментальным данным в диапазоне чисел Рейнольдса

$Re = 1,1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$ для каждого из местных сопротивлений строились зависимости $\zeta = (Re)$, которые оказались параллельными оси абсцисс. Коэффициент гидравлического трения λ в экспериментах, оценивающих гидродинамическое давление при различных степенях закрытия затвора, был равен 0,018, эквивалентная шероховатость $\Delta_s = 0,03$ мм. Независимо от степени закрытия затвора на моделях поддерживался постоянный расход для возможности дальнейшего сопоставления данных.

Оценка точности результатов измерений была выполнена согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Опыт проводился в условиях повторяемости; показатели точности определялись на основании результатов измерений внутри каждой серии, соответствующей определенному закрытию плоского затвора. При фиксированном значении фактора вычислялся размах вариаций показаний по приборам, который сопоставлялся с критическим диапазоном для уровня вероятности 0,95 при числе измерений n :

$$CR_{0,95}(n) = f(n)\sigma_r,$$

где σ_r — стандартное отклонение повторяемости; $f(n)$ — коэффициент критического диапазона.

Число замеров непосредственных величин в каждой серии экспериментов увеличивалось, если значения размаха вариаций превышали критические. Суммарная предельная относительная ошибка с вероятностью 0,95 составляла в определении расхода 1,1 %, давления — 1,0 %, коэффициента гидравлического трения — 4 %. Воспроизводимость эксперимента была проверена сопоставлением экспериментальных значений коэффициентов местного сопротивления плоского затвора, полученных в лаборатории, с данными Б.И. Яньшина [3]. Результаты совпадали с точностью до погрешности.

Для оценки гидродинамического давления были выбраны сечения до и после затвора, в которых кинематические характеристики турбулентного потока, измененные местными сопротивлениями, практически стабилизировались. В качестве длины влияния принималось сечение за затвором, в котором корректив кинетической энергии (коэффициент Кориолиса) был близок к единице. Длина влияния зависела от геометрии местного сопротивления, числа Рейнольдса (возрастая с его увеличением) и относительной шероховатости трубопровода:



$$\frac{l_{\text{вл}}}{d} = f\left(\zeta_{\text{кв}}, \text{Re}, \frac{\Delta_s}{d}\right),$$

где $\zeta_{\text{кв}}$ — коэффициент сопротивления узла в квадратичной области; Δ_s/d — относительная шероховатость трубопровода.

В результате было выбрано 18 расчетных створов, расположенных на расстоянии d друг от друга.

Процесс течения жидкости сопровождается изменением вида энергии, носителями которой являются частицы жидкости, а также потерей части энергии на преодоление сопротивления перемещению. С учетом потерь энергии уравнение Бернуlli для потока реальной жидкости между любыми двумя створами 1 и 2 определяется уравнением

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h, \quad (1)$$

где z — нивелирная высота, одинаковая для любых створов, так как водовод имел нулевой уклон; $\frac{P}{\rho g}$ — пьезометрическая высота; α — коэф-

фициент Кориолиса; $\frac{v^2}{2g}$ — скоростной напор,

вычисленный по средней скорости; αh — потери напора между сечениями.

Средняя скорость потока v — фиктивная скорость, одинаковая для всех точек живого сечения. Коэффициент кинетической энергии потока определяется по формуле

$$\alpha = 1 + 3 \frac{\omega}{v^2 \omega}, \quad (2)$$

где ω — площадь поперечного сечения водовода, по которому проходит расчетный расход; $v = Q/\omega$ — средняя скорость течения воды, проходящей через живое сечение площадью ω ; u — местная скорость в каждом из сечений; $\Delta u = u - v$ — отличие местных скоростей от средней; $d\omega$ — приращение элементарной площадки при переходе от глубины к глубине.

При прямолинейном турбулентном движении в трубах коэффициент кинетической энергии потока $\alpha \approx 1,05-1,10$. Частичное закрытие затвора резко искажает эпюру скоростей: местные скорости отличаются от средних, а корректив кине-

тической энергии отличен от единицы. Сумма первых двух членов уравнения (1) представляет собой гидростатическое давление, первых трех — гидродинамическое давление, или суммарную энергетическую характеристику потока.

Для экспериментального определения гидродинамического давления вблизи стенок водовода необходимо знать распределение местных скоростей по сечениям, что представляет достаточно сложную задачу даже в настоящее время. В действующих гидротехнических водоводах, имеющих достаточно большие размеры (до нескольких метров), внесение измерительных устройств внутрь напорного потока трудно осуществить технически. В моделях сооружений, имеющих скорости турбулентного потока порядка 3–5 м/с, любое измерительное устройство, даже крайне малых размеров, будет обтекаемым телом, создающим отдельное местное сопротивление. Согласно требованиям стандарта, регламентирующего методику измерений расхода воды в напорных трубопроводах, при загрузке измерительного сечения средствами измерений более чем на 6 % измерения проводить недопустимо [2]. Известны случаи попыток подобных измерений специальными гребенками полного напора с малыми диаметрами устьев, но приборы давали слишком большие погрешности. Возможно проведение исследований с помощью доплеровских датчиков, но это достаточно дорогостоящий эксперимент, требующий наличия соответствующей аппаратуры.

При установившемся напорном движении жидкости компоненты скорости и давления зависят от пространственных координат точки (x, y, z) : $u_x = f_1(x, y, z)$; $u_y = f_2(x, y, z)$; $u_z = f_3(x, y, z)$; $p = f(x, y, z)$. Наиболее общей системой, из которой принципиально возможно получить закон распределения скоростей в трубах прямоугольного сечения, является система дифференциальных уравнений Навье–Стокса, которая содержит четыре неизвестных, подлежащих определению, но даже дополненная четвертым уравнением — уравнением неразрывности — она не может быть решена аналитически. Это связано как с чисто математическими трудностями интегрирования нелинейных уравнений второго порядка в частных производных, так и с отсутствием достоверных сведений о законе распределения турбулентной вязкости $\epsilon = f(x, y, z)$. Для получения численного решения следует знать начальные и граничные условия протекания потока, многие

из которых в случае взаимного влияния местных сопротивлений можно получить лишь экспериментальным путем. Начальными условиями обычно служит распределение скоростей в области движения в некоторый момент времени. Границные условия задаются значениями скорости или давления на границах потока.

Для решения вопроса о распределении местных скоростей в пределах участка стабилизации потока вблизи регулирующего затвора результата гидравлического эксперимента были внесены в качестве исходных данных и граничных условий в численную модель течения, реализованную в пакете программ STAR-CD. Этот программный комплекс, предназначенный для анализа гидрогазодинамических процессов, разработан транснациональной компанией CD-adapco Group и успешно применяется в ряде отраслей промышленности, энергетики и самолетостроения. Моделирование гидравлических течений осуществляется на основе численного решения полных трехмерных нестационарных уравнений Навье—Стокса, для замыкания которых применяются полуэмпирические модели турбулентности. Весь

напорный поток в решаемой задаче был разбит на сетку, состоящую из 50-ти тысяч элементов в виде усеченных многогранников. Назначение сетки — описание граничных поверхностей расчетных областей и разбиение этих объемов на подобласти или ячейки, используемые для численного решения дифференциальных уравнений.

Правомерность использования модели была проверена сопоставлением экспериментальных полей давления внутри рассматриваемой области течения с модельными значениями (рис. 2). Это позволило использовать данные скоростных полей, полученные численно, для анализа гидродинамического давления потока при работе плоского затвора.

Значение коэффициента кинетической энергии α было определено численным интегрированием эпюр местных скоростей по створам (рис. 1). Для этого сечение потока разбивалось на малые площадки $\Delta\omega_i$ и определялось значение скорости в центрах площадок. Из условия постоянства скорости в пределах площадки коэффициент кинетической энергии вычислялся по соотношению

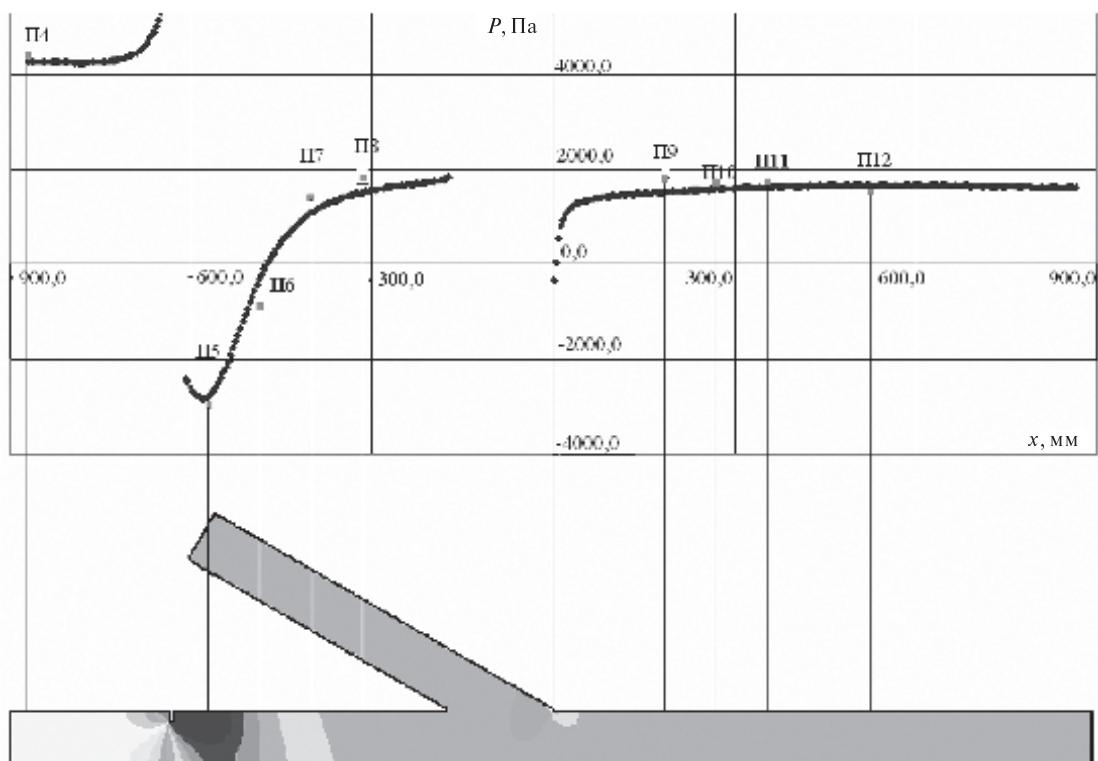


Рис. 2. Экспериментальные и численные значения гидростатического давления для модели с углом наклонной шахты $\alpha = 30^\circ$ при степени закрытия плоского затвора $a/d = 0,1$



$$\alpha = \frac{1}{\omega v^3} \sum u_i^3 \Delta \omega_i, \quad (3)$$

где u — местная скорость, известная по результатам расчетов в каждом из сечений; $\Delta \omega_i$ — площадь i -й элементарной площадки.

На рис. 3 приведено распределение гидродинамического давления по трассе горизонтально-го туннеля для различных степеней закрытия затвора при угле наклона шахты 30° . Этот случай — наиболее неблагоприятный, так как с увеличением угла наклона шахты до 150° поток имеет некоторую разгрузку в примыкающую нишу.

В горизонтальном туннеле, имеющем на-клонную шахту с углом 30° , при малых степенях закрытия затвора гидродинамическое давление превышает гидростатическое в 2,3–3,9 раза. При стеснении водопропускного сечения плоским затвором на 40 % гидродинамическое давление превышает гидростатическое уже в 3,9–9,2 раза. Области вакуума за затвором возникают начи-ная со степени его закрытия $a/d = 0,2$.

Наиболее опасным с точки зрения выброса скоростей на стенки туннеля нижние точки сечений вблизи затворов, в то время как в верх-них точках сечений возможно возникновение зон пониженных давлений и вакуума. На рис. 4 приведено отношение местных скоростей пото-ка у верхней и нижней точки сечения к средней скорости.

При работе плоского затвора в напорном тун-неле в нижней точке сечений на протяжении всей зоны влияния местные скорости выше средних в 1,7–2,4 раза, в то время как в верхних точках сечений местные скорости практически всегда ниже средних в 1,3–8 раз. Выход области повы-шенных скоростей на стенки трубопровода в ос-новном зависит от степени закрытия водопро-пускного сечения плоским затвором и составляет $1d$ от оси затвора при стеснении сечения на 10 %, $3d$ при стеснении на 20 %, $8d$ — на 30 % и $10d$ при стеснении на 40 % (для режимов течения с $l = 0,018$ и $Re = 2 \cdot 10^5$).

Пространственное распределение давлений, скалярных и векторных полей скоростей в пре-делах длины влияния плоского регулируемого затвора, расположенного перед наклонным тун-нелем в напорном водоводе, может быть полу-ченно численным моделированием результатов гид-равлического эксперимента.

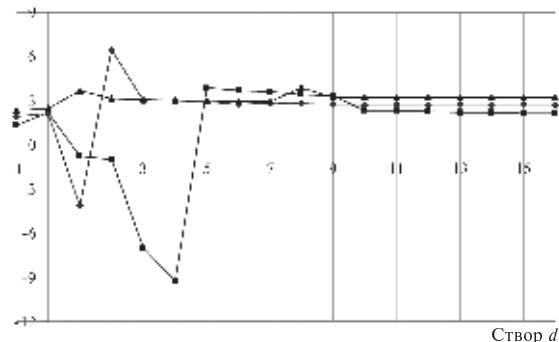


Рис. 3. Отношение гидродинамического давления к гидростатическому для модели с углом наклонной шахты $\alpha = 30^\circ$ при различных степенях закрытия плоского затвора
 (■ — 0,4; ▲ — 0,2; ★ — 0,1)

Наиболее неблагоприятным является случай, когда наклонная шахта примыкает к транзит-ному водоводу под острым углом, а расстояние между осью затвора и шахтой составляет $5d$.

С увеличением степени стеснения водопро-пускного сечения затвором гидродинамическое давление может превышать гидростатическое от 2-х до 9-ти раз.

Области вакуума на стенках туннеля за затвором начинают возникать при степени его за-крытия $a/d = 0,2$.

При расчетах гидродинамических нагрузок в области регулирующих затворов недопустимо ис-пользовать средние скорости, которые ниже мест-ных в 2–9 раз, это значительно снижает точность.

Выход области повышенных скоростей на нижнюю стенку трубопровода за регулирую-

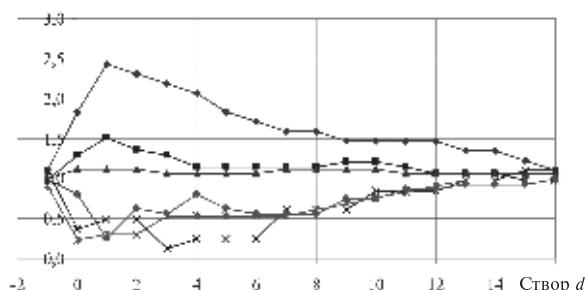


Рис. 4. Отношение местных скоростей к средней скорости для модели с углом наклонной шахты $\alpha = 30^\circ$ при различных степенях закрытия плоского затвора:
 ■ — 0,4, нижняя точка; □ — 0,2, нижняя точка;
 ▲ — 0,1, нижняя точка; × — 0,4, верхняя точка;
 × — 0,2, верхняя точка; ★ — 0,1, верхняя точка

щим затвором может достигать расстояния до $10d$ от оси затвора, увеличиваясь пропорционально закрытию водопропускного сечения. В пределах этой области целесообразно использование материалов повышенной износостой-

кости. Крайне нежелательно размещение здесь деформационных швов или стыков труб. Если по конструктивным условиям это невозможно, элементы должны быть выполнены со всей тщательностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абелев, А.С. Моделирование пульсаций суммарной гидродинамической нагрузки на плоские затворы [Текст] / А.С. Абелев // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева.— 1997.— Т. 230. Ч.1.— С. 368— 384.
2. ГОСТ 8.439—81 Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды напорных трубопроводов. Методика выполнения измерений методом «площадь — скорость».— М.: Изд-во стандартов, 1985.— 47 с.
3. Грачев, И.Г. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / И.Г. Грачев, В.М. Низовцев, С.Ю. Пирогов [и др.] СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001.— 1154 с.
4. Дульнев, В.Б. Гидравлический расчет напорных трубопроводных систем с дискретными отводами [Текст] / В.Б. Дульнев, Т.Б. Ищук // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева.— 2000. Т. 236.— С. 204—208.
5. Зубарев, Н.И. Исследование спектральных характеристик пульсации давления в проточной части радиально-осевой гидротурбины с кольцевым затвором [Текст] / Н.И. Зубарев, И.В. Пло-
- хотников // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева.— 1985. Т. 184.— С. 59— 64.
6. Казеннов, В.В. Гидравлические сопротивления напорных водоводов электростанций [Текст] / В.В. Казеннов, А.В. Мишуев // Вестник МГСУ.— 2008. № 1.— С. 210— 215.
7. Ковалев-Кривоносов, П.А. Рекомендации по компоновке отводов и арматуры в составе блоков и агрегатов судовых систем [Текст] / П.А. Ковалев-Кривоносов, В.А. Зюбан, М.-Р.А. Умбрасас // Сб. НТО им. А.Н. Крылова.— Вып. 285.— Л.: Судостроение, 1979.— С. 95—100.
8. Лысенко, П.Е. О динамическом расчете плоского затвора с учетом взаимодействия форм колебаний [Текст] / П.Е. Лысенко, Т.В. Иванова // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева.— 1980. Т. 138.— С. 43— 47.
9. Снежко, В.Л. Эффект взаимного влияния регулируемой задвижки и тройника в напорном водоводе [Текст] / В.Л. Снежко, М.С. Паливец // Приволжский научный журнал.— 2010. № 1— С. 59—65.

УДК 778.5

А.В. Бабкин, Е.И. Нестерова

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ТЕХНИКИ

Номенклатура техники, в основном зарубежного производства, представленной на отечественном рынке, постоянно расширяется, при этом даже техника аналогичного функционального назначения зачастую характеризуется как различным набором выходных квалиметрических параметров, так и различными количественными значениями этих параметров. Для достоверного сравнительного квалиметрического анализа функциональных возможностей техники, для принятия решений по выбору наиболее оптимального варианта сочетания частных па-

раметров с учетом степени важности отдельных (частных) характеристик и возможности компенсации одного параметра другим не только потребителю, но и различным дистрибутерским фирмам необходимы соответствующие квалиметрические модели, методы и алгоритмы. Очевидно, что на таких же моделях может быть основана система добровольной сертификации и тестирования техники.

Аналогичные квалиметрические подходы целесообразны для решения вопросов, связанных с выбором того или иного технологического мето-



да, производственного процесса, ибо позволяют проводить сравнительную квалиметрическую оценку выходных характеристик изделий, изготовленных с использованием различных технологий. Например, квалиметрический анализ, связанный с выбором отображающего устройства (монитора), предполагает проведение сравнительной оценочной процедуры используемых технологий изготовления жидкокристаллических мониторов или плазменных панелей и т. п., предполагающей учет степени важности той или иной характеристики, ее количественные и качественные уровни, обеспечиваемые различными технологиями производства и тестирования и т. д.

Решение данного круга задач предполагает использование методов функциональной квалиметрии [1–3]. Функциональные квалиметрические экспертизы основываются на результатах, учитывающих мнения, суждения, предшествующий опыт экспертов, сложившуюся конъюнктуру и т. п.

Вне зависимости от функционального назначения техники алгоритм сравнительного квалиметрического анализа ее функциональных возможностей по совокупности частных параметров может быть универсальным и включает определенные этапы.

Первый этап — формирование требуемой (эталонной) функциональной модели оцениваемого изделия, включающее формирование перечня выходных характеристик и определение их весовых коэффициентов. При формировании перечня выходных характеристик, их иерархии, т. е. делении характеристик на обобщенные и частные, введении (при необходимости) дополнительных иерархических уровней можно использовать различные методы: составление перечня «с чистого листа»; уточнение предложенного списка; использование нормативно-технических документов в качестве основы перечня. Однако в любом случае окончательный перечень может быть принят только на основе анализа результатов квалиметрической экспертизы.

Для определения коэффициентов весомости частных и обобщенных характеристик можно использовать различные методы: ранжирование; полные и неполные парные сравнения; метод анализа иерархий.

Если номенклатура характеристик включает такие характеристики, которые могут быть оценены не только с использованием функциональных (логические, интеллектуальные) мето-

дов, но и на основе психофизических, органолептических экспертиз. Для получения более корректных результатов целесообразно использовать методики определения коэффициентов чувствительности, а не весомости, например элементы теории обнаружения сигнала. При этом, для того чтобы определить коэффициент чувствительности, необходимо иметь два объекта: тест-объект, содержащий только информацию об исследуемом параметре (например, при оценке коэффициента чувствительности к яркости таким тест-объектом служит белый экран), и реальный объект, имеющий такой же, как и у тест-объекта, уровень исследуемого параметра. Экспертиза заключается в предъявлении группе экспертов объектов с эталонным и измененным количественными уровнями оцениваемой характеристики. Задача экспертов заключается в ответе на вопрос, заметили ли они различие в уровне оцениваемой характеристики у эталона и объекта, у которого оцениваемая характеристика могла быть изменена. Результаты экспертного опроса записываются так: *Y* — да; *N* — нет.

В качестве вероятностей принимаются относительные частоты: $P(Y/s) \approx m_{Ys}/n_s$ — вероятность правильного обнаружения; m_{Ys} — число положительных ответов при внесении ухудшения; n_s — количество предъявлений измененных изображений; $P(Y/n) \approx m_{Yn}/n_n$ — вероятность ложных тревог; m_{Yn} — число положительных ответов при отсутствии изменения яркости; n_n — количество предъявлений неизмененных изображений. По соотношению вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог определяются статистические параметры (меры различимости): d — для тест-объекта и d_Σ — для реального объекта. Коэффициент чувствительности определяется отношением $k = d_\Sigma / d$.

Для определения коэффициентов весомости обобщенных характеристик можно также использовать расчетные методы, при этом весовой коэффициент обобщенной характеристики k_i может быть представлен как средневзвешенное значение коэффициентов весомости (чувствительности) частных характеристик \bar{k}_{ij} с соответствующими «весами» g_{ij} этих коэффициентов,

зависящими от их дисперсий: $\bar{k}_i = \sum_{j=1}^m g_{ij} \bar{k}_{ij}$, где m — количество частных характеристик, па-

метров, влияющих на i -ю обобщенную характеристику. «Вес» коэффициента весомости частной квалиметрической характеристики может быть определен как $g_{ij} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2}}$. С учетом вышесказан-

$$\bar{k}_i = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2} k_{ij}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2}}.$$

нного среднее арифметическое значение коэффициента весомости обобщенной характеристики может быть рассчитано как

$$\bar{k}_i = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2} k_{ij}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2}}.$$

Дисперсия коэффициента весомости обобщенной квалиметрической характеристики также может быть рассчитана по дисперсиям коэффициентов весомости частных характеристик, параметров:

$$D[k_i] = D\left[\sum_{j=1}^m g_{ij} k_{ij}\right] = \sum_{j=1}^m g_{ij}^2 D[k_{ij}] = \sum_{j=1}^m g_{ij}^2 \sigma_{ij}^2,$$

$$\text{т. е. } D[k_i] = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2} \sigma_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2}}.$$

При расчете статистических характеристик проводимых экспертиз, как правило, целесообразно использовать вероятностно-статистические методы, а конкретный перечень определяемых параметров зависит от вида используемой окончательном этапе модели.

Среднеквадратическое отклонение субъективных оценок обобщенных квалиметрических характеристик (параметров) может быть опре-

делено как $\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\bar{k}_i - k_{ij})^2}$, где \bar{k}_i — сред-

нее значение коэффициента чувствительности к i -му параметру; k_{ij} — значения коэффициентов чувствительности, определенные при изменении остальных параметров; n — объем экспериментальной выборки.

Среднеквадратическое отклонение коэффициентов чувствительности к частным квалиметрическим параметрам, влияющим на i -ю обобщенную

характеристику, — $\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\bar{k}_{ij} - k_{ijm})^2}$, где

\bar{k}_{ij} — среднее значение коэффициента чувствительности к j -му частному квалиметрическому параметру; k_{ijm} — значения коэффициентов чувствительности к j -му частному квалиметрическому параметру, определенные при изменении остальных параметров; M — количество частных квалиметрических параметров, влияющих на i -й обобщенный параметр.

Статистические критерии оценки квалификации эксперта основаны на статистическом анализе мнений экспертов и учитывают удаленность мнения эксперта от среднего значения мнений группы экспертов. Наиболее универсальный критерий — коэффициент конкордации

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^m \left(1/m \sum_{i=1, j=1}^{m,n} G_{ij} - \sum_{i=1}^n G_{ij} \right)^2}{n^2(m^3 - m)},$$

где G_{ij} — оценка j -го объекта экспертизы i -м экспертом; n — число экспертов; m — число объектов экспертизы (количество изделий, у которых оценивается качество; количество характеристик, для которых определяется их значимость, весомость). W лежит в диапазоне от 0 до 1.

Для оценки степени согласованности мнений экспертов может быть использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена, определяющий отклонение отдельного i -го мнения от

среднего значения: $R_i = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^m d_j}{m^3}$, где d_j — раз-

ность между средней оценкой и оценкой, присвоенной экспертом j -му объекту экспертизы; R_i лежит в интервале от -1 до +1.

Второй этап — определение возможности обменных соотношений между характеристиками на разных иерархических уровнях, т. е. расчет парных коэффициентов корреляции между коэффициентами весомости. Исходными данными для расчета служат коэффициенты весомости частных и обобщенных характеристик, определенные на первом этапе.



Степень взаимосвязи между характеристиками определяется парными коэффициентами корреляции между коэффициентами весомости характеристик:

$$r_{i,i+1} = \frac{\sum_{m=1}^N (\bar{k}_i - k_{im})(\bar{k}_{i+1} - k_{i+1,m})}{N_{\sigma_i \sigma_{i+1}}},$$

где \bar{k}_i , \bar{k}_{i+1} — средние арифметические значения коэффициентов весомости характеристик, для которых определяется возможность обменных соотношений; k_{im} , $k_{i+1,m}$ — значения коэффициентов весомости характеристик, указанные экспертом с номером m ; σ_i , σ_{i+1} — среднеквадратические отклонения коэффициентов весомости характеристик; N — количество экспертов.

Для упрощения расчетов необходимо программное обеспечение, разработка которого не составляет труда, например возможно использование таблиц Excel.

Третий этап — построение оценочных шкал параметров. Поскольку, как правило, общий перечень выходных квалиметрических характеристик включает характеристики, имеющие разную размерность, в основе измерения и оценки которых лежит использование различных, чаще порядковых, шкал. Этот этап предполагает последовательное преобразование оценочных шкал, позволяющее постепенно переходить от порядковых шкал различного вида (категории, балльные, заметности ухудшений) к относительной шкале. По сути, формирование оценочных шкал включает построение сенсорных зависимостей от физико-технических, эргономических, эстетических и других параметров, полученных в результате приборных (инструментальных) измерений или экспертной оценки.

Четвертый этап — оценка фактических значений частных характеристик или технических параметров для данной модели техники — не вызывает затруднений, если на третьем этапе разработана достоверная и удобная для эксперта оценочная система (совокупность оценочных шкал). В том случае, когда эксперт затрудняется дать однозначный количественный ответ, соответствующий какой-либо реперной точке на оценочной шкале, ему должна быть предоставлена возможность дать ответ в виде интервала.

Пятый этап — расчет уровней обобщенных характеристик и интегрального уровня качества техники. Выбор модели для расчета обобщенной

квалиметрической характеристики и модели для расчета интегрального уровня качества (интегральный показатель, критерий) техники — один из основных вопросов при решении как практических, так и теоретических вопросов в любой области. Как показывает анализ, детальная проработка модели, используемой для оценки техники различного функционального назначения, конечно, должна быть различной (модель должна позволять учитывать диапазоны изменения оцениваемых характеристик, различную физическую природу оцениваемых параметров), однако вне зависимости от области использования модели к ней можно предъявить некоторые универсальные требования:

модель должна учитывать влияние отдельных характеристик на интегральный показатель качества;

она должна включать результаты оценки вероятностно-статистических параметров субъективных квалиметрических экспертиз;

в модели необходимо учитывать взаимное влияние отдельных характеристик;

желательно, чтобы одна и та же модель могла быть использована на различных иерархических уровнях оцениваемой системы. Это упростит разработку программного обеспечения, позволит проводить квалиметрические экспертизы на различных уровнях иерархии характеристик в соответствии с одним и тем же алгоритмом;

желательно, чтобы модель была удобна не только для решения задач, связанных со сравнительным квалиметрическим анализом, но также для классификации и сертификации техники. Для этого, например, расчетная модель должна одновременно быть функцией принадлежности к терм-множествам многомерной классификационной шкалы;

необходимо, чтобы модель включала параметры, которые могут быть определены в результате единой квалиметрической экспертизы.

Формирование интегрального показателя качества объекта — расчетная задача, поскольку ее решение и точность этого решения определяются выбором метода свертывания единичных характеристик (параметры, показатели). Интегральный показатель (критерий) позволяет связывать набор лингвистических переменных на входе оцениваемого объекта (изделие, услуга, система) с одной выходной лингвистической переменной, т. е. формировать интег-

ральную оценку по набору входных лингвистических переменных.

В качестве интегрального показателя может быть выбрана функциональная зависимость выходного показателя от исходных характеристик или средневзвешенный показатель. Функциональные модели, используемые при решении частных практических квалиметрических задач, чаще всего являются технико-экономическими показателями, определяющими взаимосвязь полезного суммарного эффекта и соответствующих затрат на создание, эксплуатацию.

Шестой этап — формализация полученных результатов в зависимости от цели проводимой экспертизы. Цели функциональных квалиметрических экспертиз: сравнительный квалиметрический анализ, классификация, ранжирование, присвоение градации, сорта, количества «звездочек», сертификация различных моделей и образцов техники.

Использование любой модели интегрального показателя позволяет с тем или иным уровнем достоверности проводить квалиметрический анализ техники по совокупности выходных параметров. Однако решение вопросов классификации требует использования таких интегральных квалиметрических моделей, которые позволяют для принятия окончательного решения формировать классификационные квалиметрические шкалы, построенные, например, на основе методов кластерного анализа или нечетких множеств. Алгоритм формирования классификационной шкалы должен включать, как минимум, два этапа: на первом этапе на основе экспериментальных исследований (экспертные процедуры, приборные измерения) формируются одномерные лингвистические шкалы, на втором этапе — многомерные классификационные лингвистические шкалы. Второй этап, очевидно, — расчетный, на этом этапе возможно использование различных расчетных интегральных моделей.

Таким образом, оценка качества техники основывается на анализе результатов функциональных (интеллектуальные, логические) экспертиз, т. е. на использовании совокупности («гибридизация») методов интеллектуальной обработки информации, которая носит название «мягких вычислений» (soft computing). Термин был предложен Лотфи Заде в 1994 году и подчеркивает наиболее сильное влияние, в первую очередь, нечеткой логики, которая наделила новой

функциональностью классические методы обработки результатов.

«Гибридизация» методов интеллектуальной обработки информации подразумевает объединение таких направлений, как:

формирование лингвистических шкал характеристик;

использование методов нечетких нейронных сетей (fuzzy neural networks) — разработку архитектуры сети (наибольшее распространение в настоящее время получили архитектуры нечетких нейронных сетей вида ANFIS и TSK, поскольку эти сети — универсальные аппроксиматоры); нахождение значений параметров с использованием аппарата нечеткой логики; переход на более высокий уровень с помощью функций активации; определение параметров функций принадлежности с использованием алгоритмов обучения сети;

разработка методик нечетких запросов к базам данным (fuzzy queries); нечетких ассоциативных правил (fuzzy associative rules) извлечения из баз данных необходимых закономерностей; нечетких когнитивных карт (fuzzy cognitive maps), отражающих причинно-следственные связи между параметрами и степень влияния (вес) один на другие;

использование методов нечеткой кластеризации, предусматривающих, что объект может одновременно принадлежать нескольким кластерам;

методы многокритериальной оптимизации, в частности метод анализа иерархий и приоритетов альтернатив (1990-е годы, Т. Саати), система поддержки принятия решений «*Expert Choice*» и др.

Несмотря на кажущуюся простоту и конкретность функциональных квалиметрических методик, функциональная квалиметрия — одна из наиболее динамичных областей. Причины — в бурном расширении спектра технических средств, совокупности выходных характеристик которых необходимо оценивать и сравнивать. Разработка кардинально новых технологий, лежащих в основе изготовления, эксплуатации, сервисного и технического обслуживания техники, делает сложным принятие решений о выборе той или иной модели, о целесообразности освоения той или иной технологии. В то же время для решения этих вопросов появляются новые возможности, предоставляемые разнообразными информационными технологиями и программными средствами.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нестерова, Е.И.** Квалиметрия и техническое регулирование в кинематографии [Текст] / Е.И. Нестерова // СПб.: Политехника, 2010.— 183 с.
2. **Нестерова, Е.И.** Методология экспертной квалиметрии и сертификации систем качества в кинематографии [Текст] / Е.И. Нестерова // СПб.: Политехника, 2005.— 248 с.
3. **Нестерова, Е.И.** Квалиметрические технологии в системах качества предприятий и организаций кинематографии [Текст] / Е.И. Нестерова / СПб.: Политехника, 2007.— 152 с.

ВОПРОСЫ ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 374.33

Ю.С. Васильев, В.А. Попова

ПОДДЕРЖКА МОЛОДЕЖИ И ИННОВАЦИЙ (15 ЛЕТ ФОНДУ ТВН СПбГПУ)

Сложные 90-е годы XX века принесли с собой массовое появление в высших учебных заведениях организаций новых форм. Так, в 1991 году появились малые предприятия научно-технической сферы; в 1994 году был создан Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия); в 1995-м образовались первые элементы инновационной инфраструктуры — инновационно-технологические центры. В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете был создан Фонд ТВН — инновационно-технологический центр СПбГПУ.

Быстрому развитию деятельности Фонда ТВН способствовали тесные связи между СПбГПУ и Фондом содействия. В значительной мере благодаря Фонду содействия оказалось возможным восстановить после пожара учебный корпус Техники высоких напряжений Политехнического университета. Генеральный директор Фонда содействия профессор доктор технических наук Иван Михайлович Бортник личным участием помог привлечь профильные для факультетов университета компании и содействовал активному участию сотрудников университета во всех программах Фонда содействия.

Деятельность Фонда содействия была направлена не только на реальную финансовую поддержку малых предприятий в очень трудный для них период, но и на создание, во-первых, культуры бизнеса в России и, во-вторых, ознакомление научного сообщества с мировыми достижениями в области инноваций. Фонд содействия одним из первых познакомил российскую общественность с такими понятиями, как венчурное финансирование, а также с принципами работы зарубежных инкубаторов и технопарков и программами финансирования проектов на посевной стадии. При этом Фонд содействия всегда уделял и уделяет особое внимание вовлечению вузовской молодежи в процесс создания новых знаний и применения их для организации новых бизнесов.



Рис. 1. Торжественное открытие инновационно-технологического центра Фонда ТВН, декабрь 1996 г.



Рис. 2. Иван Михайлович Бортник на Международной неделе предпринимательства в Доме ученых в Лесном (октябрь, 2008 г.)



Сегодня признано, что единственным способом организации в России экономики, основанной на знаниях, является вовлечение в этот процесс молодежи.

Именно на поддержку талантливой молодежи нацелена программа Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере под названием «УМНИК» — «Участник молодежного научно-инновационного конкурса», которая стартовала в 2007 году.

Цель программы «УМНИК» — стимулировать реализацию студентами, аспирантами и молодыми учеными собственных разработок, основанных на идеях, отличающихся как существенной новизной, так и возможностью коммерциализации в разумные сроки. Размер гранта по Программе составляет 400 тыс. рублей (по 200 тыс. рублей в год в течение двух лет). Заметим, что к участию в жюри конкурса привлечены лучшие научные силы страны — члены программных и организационных комитетов ведущих конференций, ежегодно проводимых в Российской Федерации, получивших специальную аккредитацию в Фонде содействия.

«Программа «УМНИК» для вуза важна, в первую очередь, потому, что она поддерживает аспирантов и позволяет им сосредоточиться на научной работе. Тем самым она способствует закреплению молодых способных ученых в науке.

Кроме того, она содействует решению задачи создания инновационного пояса вуза — он должен быть, и его уже сейчас надо формировать».

*Ректор СПбГПУ М.П. Федоров
(ректорское заседание 17.12.07)*

Реализация программы позволит выявить и привлечь к созданию новых малых инновационных предприятий (МИП) молодых исследователей, энергия и креативность которых будут способствовать успеху. Технология отбора победителей конкурса нацелена на повышение в их среде доли желающих создать собственный бизнес с обычных 5–8 % в среднем по выборке до 20–30 %.

Одновременно программа решает не менее важную для подъема экономики страны задачу — удержание молодежи в научно-технической сфере, в том числе в вузах, а значит, включает сегодняшнюю молодежь в процесс подготовки новых кадров.

В организации программы «УМНИК» от Санкт-Петербурга участвовали Политехнический,

Электротехнический университеты и Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе — на четырех конференциях, организованных на их базе, были проведены первые конкурсы.

«Есть же молодые ребята, которым 25–30–35 лет. На такой контингент и надо рассчитывать. Это они когда-нибудь что-нибудь смогут открыть», — сказал Андрей Гейм в интервью газете «Комсомольская правда» (5 октября 2010 г. Нобелевский комитет в Стокгольме назвал Андрея Гейма и Константина Новоселова лауреатами Нобелевской премии по физике).

Сегодня отбор номинантов программы «УМНИК» проводится на 20 конференциях, организованных на базе 14 научных и учебных учреждений по всем 4 направлениям (рис. 3).

Экспертный совет Санкт-Петербурга, отбирающий победителей, состоит из 53 представителей 27 организаций. Как видно, научное сообщество города активно участвует в работе программы.

Всего за три года существования программы в конференциях-номинациях Санкт-Петербурга приняли участие свыше 2,5 тысяч студентов, аспирантов и молодых ученых, 275 стали победителями программы «УМНИК» (Умники). Подавляющее большинство проектов-победителей представлено организациями Санкт-Петербурга, тем не менее 11 % победителей конкурса составляют участники конференций из 15 других городов, от Благовещенска до Петрозаводска. Эта цифра характеризует мобильность молодежи — условие, необходимое для обмена знаниями между научными школами России.

Распределение победителей конкурса по организациям Санкт-Петербурга, от имени которых были представлены доклады, характеризует рис. 4. Наибольшее число проектов-победителей — более 50 % — ежегодно представляют университеты, причем подавляющее большинство — Политехнический, ЛЭТИ, Классический, ИТМО и Технический. В последнее время заметно выросла активность представителей медицинских учреждений — в 2009 году ими представлено более 20 % проектов. Если до последнего года проекты с медицинской тематикой отбирались на непрофильных конференциях, то в 2010 году уже 4 ведущие медицинские учреждения (это важно) Санкт-Петербурга включились в программу «УМНИК» и заявили проводимые ими конференции для отбора номинантов по программе.



Рис. 3. Плотность интеллектуальной среды Санкт-Петербурга, характеризуемая количеством победителей программы «УМНИК»:

— учреждения; — организации инновационной инфраструктуры; — победители программы «УМНИК»

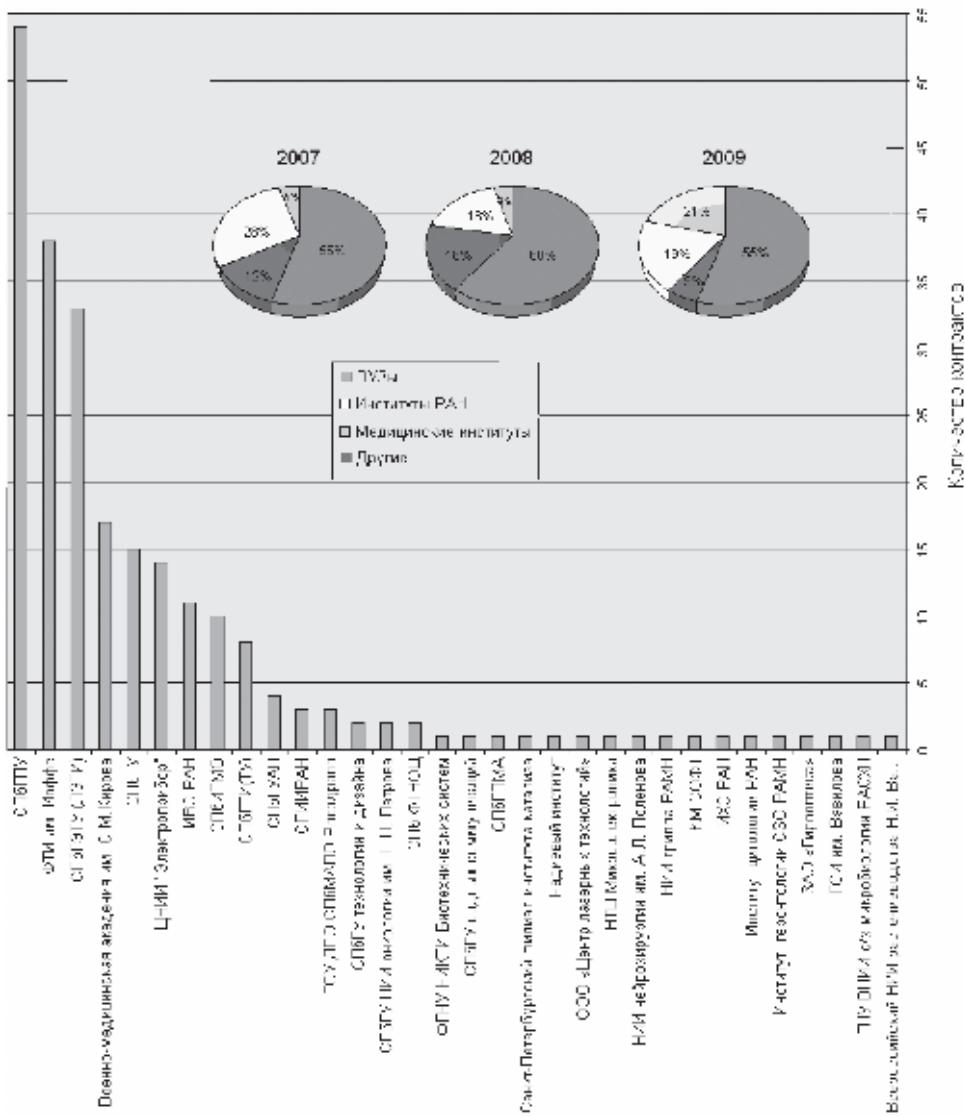


Рис. 4. Активность участия организаций Санкт-Петербурга в программе «УМНИК»

На рис. 5 показано распределение проектов по тематике в 2007–2009 годах. Условно проекты Умников Санкт-Петербурга можно разделить на четыре тематические категории: нанооптоэлектроника; науки о жизни и экология; программное обеспечение; специальные устройства и материалы. Как видно, распределение по тематикам несколько варьируется от года к году. При этом относительно мало число проектов по категории «Специальные устройства» и, наоборот, число проектов по категории «Науки о жизни» — велико. Такое распределение характеризует развитие технологических отраслей города. Если в СССР

большая часть разработок была ориентирована на ВПК, то сегодня центр тяжести переместился в медицину и экологию. Неожиданно мало проектов посвящено информационным технологиям. По-видимому, высокотехнологические разработки в этой области, которая тоже затратна, выполняются компаниями по заказам и не требуют бюджетной поддержки.

Пока еще малая длительность программы не позволяет проследить во времени судьбу проектов и их исполнителей — на сегодня всего 40 победителей конкурса завершили двухгодичную работу над проектами. Тем не менее первые дан-

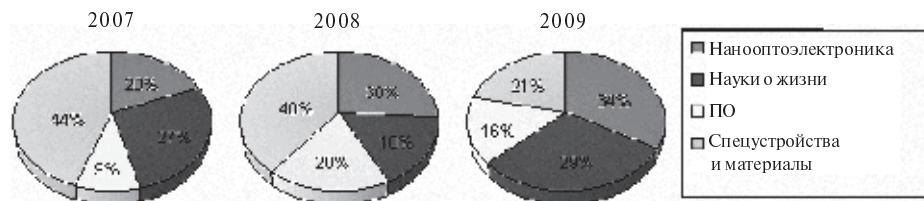


Рис. 5. Распределение проектов по тематике в 2007–2009 годах

ные позволяют сделать предварительные выводы, которые интересно сравнить с результатами опроса о планах развития проекта, проведенного в 2007 году.

Результаты опроса 42 респондентов приведены на рис. 6. Как видно, большинство Умников планировали доведение своих разработок до коммерческого продукта и намерены реализовать свои планы либо через программу «СТАРТ», либо через профильное действующее предприятие. При этом 16 % респондентов планировали полностью сосредоточиться на продолжении научных исследований.

Из этих 42 человек 33 продолжили работу над проектом в рамках второго года программы и успешно завершили ее в 2009 году. Пять из них (15 % от перешедших на второй год) создали свои предприятия (четыре — в рамках программы «СТАРТ», один — без бюджетной поддержки), четыре человека работают над подготовкой заявки на конкурс программы «СТАРТ». Используют результаты своей разработки на предприятиях (часть из них — на «материнском») 21 % респондентов. Продолжают исследования около 70 %, при этом лишь для одной трети из них научная деятельность является основной. За время наблюдения пять человек защитили

кандидатские диссертации, двое получили гранты Президента РФ для молодых российских ученых.

Таким образом, более 40 % Умников 2007 года уже успешно продвигают результаты своих разработок, большая часть продолжает научные исследования, при этом ценность 23 % приводимых исследований и целеустремленность авторов подтверждены авторитетными научными кругами (рис. 7).

Сама формулировка номинации программы «УМНИК» говорит, что речь идет о коммерциализации проектов-«марафонцев». По классификации организаторов конкурса бизнес-планов в Мюнхене: «...существуют проекты «спринтеры» и «марафонцы». К спринтерам относим проекты, где предполагается выход на рынок при финансировании менее миллиона евро. Марафонцы — это, как правило, проекты, базирующиеся на патентах, и там отдача от новой компании происходит существенно позднее и при более значительном финансировании».

Перспективы развития МИП, основанных на патентах, определяются, по крайней мере, наличием трех составляющих (рис. 8):

идей, потенциально пригодной для создания инновационного для рынка продукта;

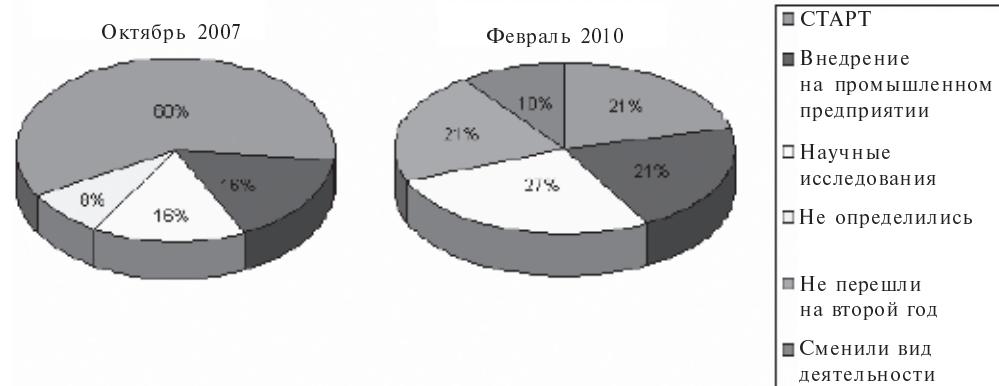


Рис. 6. Планы и первые результаты Умников Санкт-Петербурга



Рис. 7. Представление лучших разработок молодых ученых на Петербургском международном инновационном форуме, сентябрь 2010 года

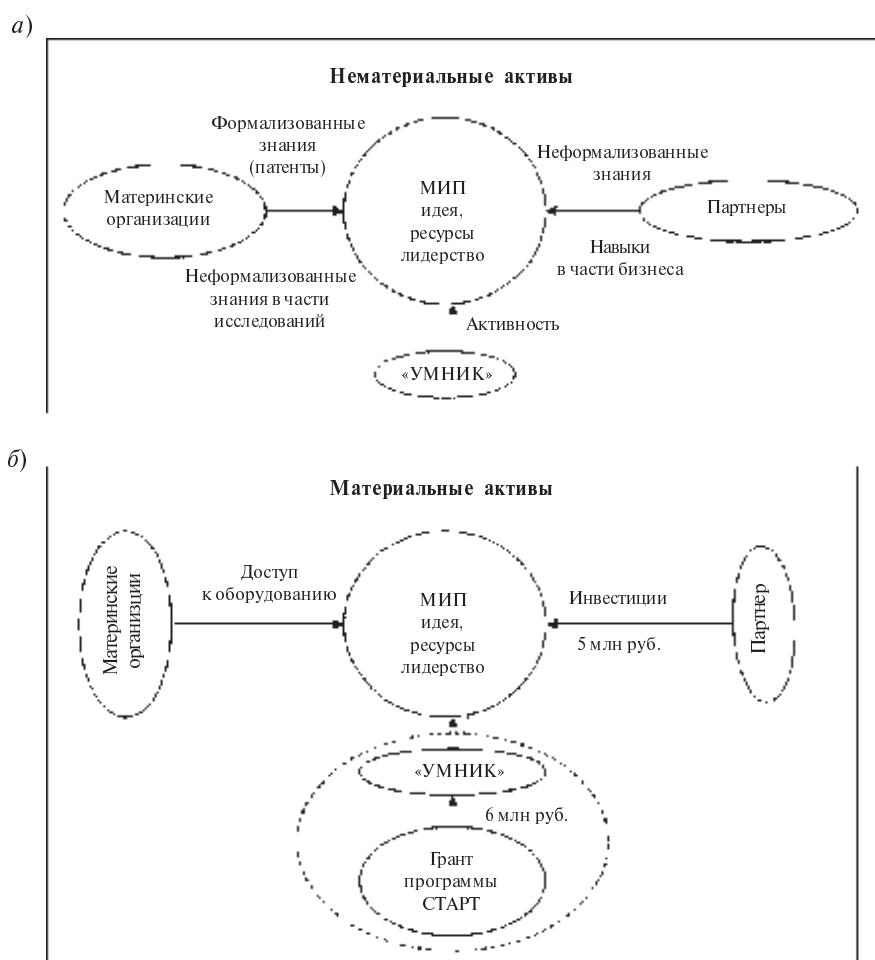


Рис. 8. Условия организации и обеспечение развития новых инновационных предприятий

возможности привлечения ресурсов, необходимых для реализации идеи;

лидера, способного придумать и осуществить все действия, необходимые для превращения идеи в коммерческий продукт и организации продаж.

Как правило, начальная идея проекта Умника появляется как следствие выполненных им работ, хотя и не всегда. Она может быть передана в виде формализованных знаний (патентов), к чему направлен Федеральный закон ФЗ-217, или неформализованных знаний, которые составляют большую часть интеллектуального капитала. Уже на этой стадии стартующему бизнесу для успеха необходимы партнеры, которые расширят спектр и объем получаемых неформальных знаний и навыков.

Ключевым фактором при создании и становлении МИП является, все-таки, наличие лидера, и сегодня его можно найти только среди молодых исследователей, которые именно таким образом хотят себя реализовать. Программа «УМНИК» не только позволяет выявить и дать им возможность сосредоточиться на работах по проекту, но и содействует началу формирования новых связей между материнской организацией и Умниками-лидерами. При этом вузы и институты РАН к установлению новых взаимоотношений с научно-образовательным бизнесом подталкивает недавно принятый Федеральный закон ФЗ-217 (хотя он и нуждается в существенных дополнениях и развитии).

Финансирование стартующих бизнесов в первую очередь является задачей государства, тем более если речь идет о создании 1000 новых МИП ежегодно. В настоящее время поддержку находящимся на предпосевной и посевной стадиях предприятиям предоставляет только Фонд содействия, финансирующий новые МИП в рамках программы «СТАРТ».

Программа «СТАРТ» была открыта в 2004 году. Ее задача состоит в оценке инновационного потенциала исследователей и стимулирования его развития относительно небольшим внешним воздействием. Программа предусматривает не только финансовую, но и иную поддержку ученых, решивших организовать частный бизнес на базе новых научно-технических разработок, оформленных в виде интеллектуальной собственности (патент, ноу-хау и др.). Объем гранта, предоставляемого победителям конкурса «СТАРТ» для компенсации затрат на НИОКР,

может составлять до 6 000 000 рублей в течение трех лет, причем обязательным условием перехода на второй и третий года является привлечение внебюджетных средств инвестора. Объем гранта первого года — 1 000 000 рублей. Этот этап реализации проекта является «посевным» в полном смысле этого понятия, когда заявители за небольшие средства, предназначенные для финансирования исследований и разработок и предоставляемые им на безвозвратной основе, определяют и осуществляют ряд действий, призванных убедить инвестора в реальности (или нереальности) коммерциализации результатов научных исследований.

Установление и развитие связей Умников с бизнес-сообществом и деловыми кругами является одной из задач организации инновационной инфраструктуры, и программа «УМНИК» способствует решению этой задачи. Эффективное ведение проектов Умников невозможно без привлечения к ним максимально широкого внимания внешних кругов для установления партнерских связей. В дальнейшем партнер может выступать как прямым инвестором проекта в программе «СТАРТ», так и привнести в проект дополнительные ресурсы, необходимые для проведения НИОКР, создания прототипа, ориентации в рыночных перспективах. Важнейшим ресурсом, который может предоставить партнер, является возможность регулярного обсуждения хода проекта.

Механизмы, используемые для решения задачи развития партнерских связей, различны: это информационная поддержка, семинары, в том числе проводимые в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», специализированные тренинги, деловые встречи и игры, участие в выставках. Все эти мероприятия способствуют развитию навыков общения и представления себя как лидера своей команды и проекта.

Заметим, что аналогичная поддержка необходима и Умникам, желающим сконцентрироваться на научных исследованиях.

Хороший эффект по привлечению потенциальных партнеров дает размещение информации о проекте (профиль компании/проекта) на специализированных сайтах европейской седьмой рамочной программы (www.cordis.europa.eu/fp7/home_en.html), НКТ «Малый и средний бизнес»



(Фонд является национальной контактной точкой www.ncp-fp7-sme.ru), Европейской сети поддержки предпринимательства (Enterprise Europe Network — EEN, www.enterprise-europe-network.ec.europa.eu), к которой есть доступ через проект «Gate to Russian Business Innovation Networks» (www.gate2rubin.ru). Кроме того, подготовка профиля и его «оттачивание» в ответ на вопросы и встречную информацию сами по себе весьма полезны и позволяют предпринимателю уяснить для себя многие детали проводимого проекта.

Опыт «раскручивания» новых технологических бизнесов хорошо известен. Выход успешных бизнесов не превышает 5 %, даже при очень серьезной поддержке (рис. 9).

Тем не менее успех возможен даже и при российской, более чем скромной, «подкормке». Наверное, он требует несколько других качеств, которыми обладают российские Умники.

Для успеха «оборудование, безусловно, важно. Гранты — безусловно. И бюджет лаборатории, безусловно, важен. И еще несколько параметров, которые важны, — это сотрудники, которые готовы работать и хотят работать, и сообщество вокруг вас, которое открыто, которое готово быстро-быстро перестроиться, что-то обсудить с тобой. ... Очень сложно сказать, сколько (средств) нужно для эффективной работы. Сколько есть, столько и нужно... без привлечения каких-то глобальных средств», — делится, может быть, с Умниками Константин Новоселов.

В 2001 году в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете был создан первый центр коллективного пользования (ЦКП) в рамках соответствующей программы Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение об учреждении которого подписали 8 организаций; при его создании на средства Министерства были приобретены два прибора: масс-спектрометр и система капиллярного электрофореза. Фонд ТВН за счет заемных средств Фонда содействия отремонтировал помещение центра. Все. Но для «новорожденного» этого совершенно недостаточно. В первую очередь нужно было решить:

как себя позиционировать?

как управлять?

где взять ресурсы: кадры, сопутствующее оборудование, финансирование?

Неожиданно реальный интерес к ЦКП проявили отнюдь не научные и учебные организации, а две коммерческие компании — участники Соглашения о создании ЦКП, при этом интерес совершенно некоммерческий. Компания «Экрос» сделала проект химической лаборатории и передала ЦКП специальную мебель; компания «Люмэкс» выделила первое оборудование, необходимое для проведения пробоподготовки, перевела в ЦКП работы по международному гранту программы «Наука для мира» с первыми кадрами и контактами, в том числе с профессором СПбГУ Анной Алексеевной Карцовой.

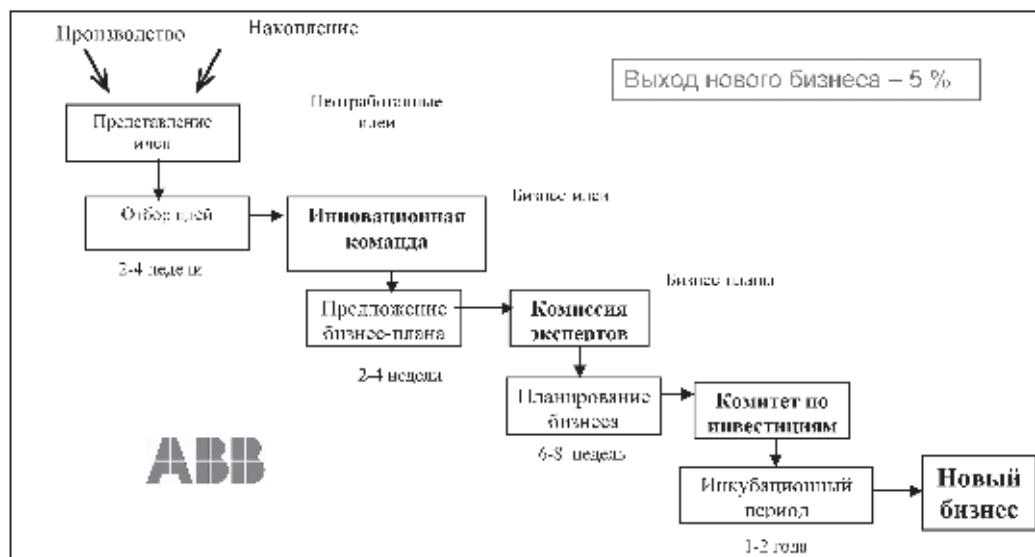


Рис. 9. Процесс организации развития идеи до нового бизнеса (ABB, Швейцария)



Для управления ЦКП было принято решение о создании МИП – ООО ЦКП «Аналитическая спектроскопия». Но главное, что дали в подарок новорожденному МИП, — это контакты. В установлении контактов и выявлении возможных направлений развития ЦКП приняли участие многие хорошие люди. Вместе с ЦКП «AC» росли и исполнители работ.

Сегодня в лаборатории ЦКП (рис. 10) работают 9 человек, большая часть из них — химики-аналитики, ученики А.А. Карцовой. Теперь среди них уже 4 кандидата химических наук и один (выпускник РФФ СПбГПУ) — кандидат физико-математических наук. ЦКП позиционирует себя как лаборатория по проведению нестандартных исследований в области биохимии, медицины, фармакологии. Это разработка методов и методик для определения лекарственных препаратов и биологически-активных веществ, физиологических объектов. Исследования проводятся для всех ведущих медицинских центров города: Медицинского университета им. академика И.П. Павлова, Федерального центра сердца, крови и эндокринологии им. В.А. Алмазова, Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова, НИИ онкологии им. Н.И. Петрова, для предприятий фармацевтического профиля: Государственного НИИ особо чистых биопрепаратов, ЗАО «Фармсинтез» и ряда других государственных и частных организаций. ЦКП весьма активно и успешно участвует в формировании проектов по Седьмой рамочной программе,

в профильных конкурсах федеральных целевых программ, городских конкурсах, в том числе совместно с СПбГПУ и СПбГУ.

Что важно: контакты, установленные ЦКП «AC», развиваются по спирали. Так, в числе первых точек соприкосновения ЦКП с внешним миром был (и есть) Институт экспериментальной медицины, где проходил практику студент, сын профессора СПбГУ С.И. Черныша — специалиста, нашедшего неиссякаемый источник лекарственных препаратов, неаллергенных для человека. Проект С.И. Черныша был первым проектом, который Фонд ТВН представил генеральному директору Фонда содействия И.М. Бортнику при подготовке первого конкурса программы «СТАРТ». А сегодня ООО «Аллофарм» — одна из 48 компаний, перешедших на третий год программы «СТАРТ», причем на условиях обеспечения софинансирования из собственных средств. За это время компания успешно вывела на рынок несколько продуктов, ведет разработку новых препаратов и на последнем конкурсе по программе «УМНИК» представила один из лучших проектов. И по-прежнему ЦКП выполняет для «Аллофарма» исследования, связанные с разработкой препаратов.

Сегодня химики-аналитики ЦКП — ресурс СПбГПУ по расширению в университете исследований по биомедицинским технологиям. По оценкам академика Г.А. Месяца («Поиск», № 19–20 от 14.05.2010 г.), вузам для освоения но-



Рис. 10. Коллектив ЦКП «AC»



вой закупаемой ими техники и получения от ее использования отдачи потребуется 20–30 лет, поскольку для этого «нужно иметь квалифицированные кадры, имеющие опыт работы на современном оборудовании». Скорее всего, Геннадий Андреевич не ошибается, а СПбГПУ уже имеет такие кадры, выращенные за предыдущие 10 лет, и профильные контакты.

История ООО ЦКП «АС» это путь, который придется пройти большинству МИП, создаваемых Умниками.

Содействовать успеху всех (а сегодня это, конечно же, молодые, решившие стать на путь создания инноваций) — на это нацелена вся деятельность Фонда ТВН, все проводимые проекты и организуемые мероприятия.

УДК 378.1

Е.В. Винокуро^{ва}, А.Л. Галиновский, Е.И. Пудалова

ПЕРСПЕКТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СЕРТИФИКАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ НА ОСНОВЕ ТРЕБОВАНИЙ РАБОТОДАТЕЛЕЙ

История сертификации¹ в России насчитывает около двадцати лет. Фактически у вопросов сертификации² со вступлением в силу государственной системы стандартизации в Российской Федерации появился правовой статус, определяемый Законом «О стандартизации», принятым впервые в нашей стране 10 июня 1993 года № 5154-1. Согласно этому закону объектами стандартизации являются продукция, работа, процесс, услуги, подлежащие стандартизации, т. е. для которых разрабатываются те или иные требования, характеристики, параметры или правила. Однако в соответствии с редакцией Федерального закона от 10.07.2002 № 87-ФЗ этот Закон не регулирует отношения, связанные с государственными образовательными стандартами,

и, следовательно, все вопросы сертификации кадров в нашей стране носят добровольный характер и не входят в юрисдикцию государственных органов исполнительной власти. Тем не менее при организации сертификации кадров следует придерживаться существующих требований Национального стандарта Российской Федерации «Общие требования к органам по сертификации персонала» — ISO/IEC 17024:2003.

Согласно существующим нормам добровольная сертификация осуществляется по инициативе заявителя на условиях договора между заявителем и органом по сертификации. В данном случае добровольная сертификация осуществляется для установления соответствия требованиям работодателей, по сути, являясь признаком рыночных отношений и развивающегося гражданского общества в нашей стране. Несмотря на наличие достаточно большого опыта проведения сертификации в России, в том числе под эгидой крупных международных компаний, сертификация инженерных кадров — по-своему уникальный прецедент, реализованный впервые Объединенной авиастроительной корпорацией «ОАК» в 2010 году. Таким образом был дан старт для начала реализации данной процедуры на практике и создания пилотной теоретической, методической и организационно-технической базы. Залогом успеха в достижении положительных результатов является интеграция потенциала

¹ Сертификация — процедура подтверждения соответствия, посредством которой независимая от изготовителя (продавца, исполнителя) и потребителя (покупателя) организация удостоверяет в письменной форме, что продукция соответствует установленным требованиям. Также сертификация — это форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия объектов требованиям технических регламентов, положениям стандартов, сводов правил или условиям договоров (в ред. Федерального закона от 01.05.2007 № 65-ФЗ). Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>.

² Сертификат — (франц. certificat) — от средневекового лат. certifico — удостоверяю.

учебных заведений системы высшего профессионального образования и предприятий из числа представителей научно-исследовательского сектора экономики и их кооперация.

Цели и задачи создания системы сертификации инженерных кадров

Современная система подготовки инженерных кадров функционирует в условиях рассогласованности рынков труда и образовательных услуг. Об этом свидетельствует несоответствие требований, предъявляемых работодателями, уровню и качеству подготовки специалистов в системе высшего профессионального образования инженерно-технического профиля. Вместе с тем мировые и европейские тенденции развития общества, интенсивное совершенствование техники и технологий порождают все новые требования к качеству профессионального образования и личности специалиста. Помимо того, для высшей технической школы при любых условиях характерна тенденция к модернизации, связанная с необходимостью соответствия качества подготовки инженеров уровню достижений научно-технического прогресса. Таким образом, социальный заказ на подготовку инженерных кадров системой высшего профессионального образования диктует особые требования к уровню и качеству подготовки. Необходимо осознать, что проблема подготовки современных высококвалифицированных кадров, ориентированных на высокотехнологичный сектор экономики и производства, в условиях развития рыночных отношений и модернизации экономики становится все более актуальной.

Постоянно изменяющиеся критерии качества подготовки специалистов требуют подбора новых методов, разработки новых концепций и подходов, относящихся как к процедуре оценки уровня подготовки, так и к исходному контролируемому материалу, формирующему содержание образования. Одним из таких подходов является добровольная сертификация выпускников вузов и специалистов в соответствии с профессиональными стандартами, сформированными рынком труда. Результативность процедуры сертификации неотъемлемо связана с эффективностью проектирования, организации и управления данной системой, будучи при этом специфической социокультурной проблемой.

Система сертификации в случае ее реализации на практике способна улучшить контингент специалистов, идущих работать по специальности на профильные предприятия высокотехнологичного сектора экономики, сократить сроки адаптации кадров на рабочих местах. Следовательно, сертификация выпускников и специалистов может стать ведущим фактором совершенствования высшего профессионального образования и смежных с ним социальных институтов.

Научная проблема, которую необходимо решить в процессе создания системы сертификации инженерных кадров, заключается в раскрытии существующих противоречий между:

требованиями работодателей к качеству профессиональной подготовки выпускников вуза, заложенными в профессиональных стандартах, и отсутствием системного подхода к управлению данным качеством, включая сертификацию выпускников;

необходимостью количественной оценки уровня подготовки инженеров и отсутствием квадратиметрических критериев для его определения;

потребностью преподавателей, представителей работодателей и государства в достоверной информации о соответствии уровня подготовки выпускников требованиям профессиональных стандартов и невозможностью ее получить из-за отсутствия методик оценки компетенций и комплекса измерительных материалов;

желанием выпускников иметь преимущества при отборе на престижные должности (кадровые позиции) в высокотехнологичных предприятиях и отсутствием возможности получения таких преимуществ путем прохождения процедуры сертификации, получения сертификата.

Перечисленные противоречия свидетельствуют, что до сих пор в теории и практике высшего профессионального образования существовала объективная проблема научного обоснования процесса сертификации выпускников, апробации процедуры оценки качества подготовки на предмет соответствия требованиям рынка труда [1]. Это свидетельствует также о теоретической и научно-практической значимости разработки теоретических основ сертификации выпускников и специалистов высокотехнологичного сектора экономики. Наши исследования соответствуют идеологии Концепции модернизации российского образования, в которой сформули-



рована основная цель профессионального образования — подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности.

В современной отечественной науке проблемы образования как социального института изучаются специалистами разных отраслей знания — педагогами, психологами, философами, социологами. Многоаспектность поставленной проблемы требует привлечения к ее решению положений различных научных направлений: экономической теории, менеджмента, профильных научно-технических направлений, социологии и общей педагогики.

Таким образом, целью исследования должна стать разработка и обоснование теоретических основ проектирования, организации и управления системой сертификации инженерных кадров, которая рассматривается как научная система принципов, целей, задач, методов и моделей развития, обеспечивающих получение актуальной достоверной информации об индивидуальных образовательных достижениях выпускников с позиции и в интересах обучающихся, представителей работодателей и органов управления образованием.

Достижение поставленной цели требует:

систематизировать результаты существующих исследований, выполнить анализ эволюции научных взглядов, практики и современного состояния на рынке труда в высокотехнологичном секторе экономики, оценить его потребности в качественно-количественном составе кадров;

проанализировать проблемы отбора и трудоустройства выпускников и специалистов, определив принципы, тенденции и механизмы развития взаимодействия учебных заведений и работодателей;

выявить специфические особенности и базовые проблемы становления и развития системы сертификации инженерных кадров как объекта управления;

структурить состав основных базовых элементов системы сертификации, сформулиро-

вав базовые принципы согласованного управления этим процессом в интересах рынка труда и профильных учебных заведений и построив алгоритмы функционирования;

разработать теоретические основы формирования комплекса измерительных материалов для оценки уровня подготовки специалистов, сформировать общую структурно-методическую и организационно-техническую схемы реализации;

предложить систему сертификации выпускников и специалистов в контексте адаптации к конъюнктуре рынка труда;

создать и апробировать комплекс оригинальных измерительных материалов как совокупности моделей, алгоритмов, нормативов, положений в составе системы сертификации и поддержки управленческих решений при ее реализации.

В результате решения данных задач станет возможным использовать актуальную и достоверную информацию об индивидуальных результатах сертификации выпускников и специалистов, что приведет к повышению качества профессионального образования и результативности трудоустройства кадров по специальности, улучшит качественно-количественные показатели эффективности кадрового потенциала на предприятиях высокотехнологичного сектора экономики.

Методика проведения ключевых этапов сертификации

Умения и навыки профессиональных действий вырабатываются и закрепляются студентами в вузе в процессе выполнения лабораторных и курсовых работ, производственных практик и дипломного проекта. Приобретенные студентом в процессе обучения умения и навыки подтверждаются оценками в выписке из зачетной ведомости, являющейся приложением к диплому, а документ, подтверждающий получение квалификации по специальности, — это диплом об окончании вуза.

Выпускник вуза на добровольной основе может получить дополнительный сертификат о владении умениями и навыками профессиональных действий в соответствии с профессиональными функциями, сформированными работодателями. Для получения дополнительного сертификата выпускник или специалист дол-

жен выполнить несколько практических заданий, полученных в сертификационной комиссии, или защитить свои навыки и умения с использованием ранее выполненных в вузе курсовых и дипломных работ и представлением заверенных установленным порядком копий всех необходимых документов и материалов. Если выпускник до момента сертификационных испытаний работал на предприятии или НИИ каких-либо отраслей промышленности, он может также представить заверенные установленным порядком копии всех необходимых документов и материалов.

Выполнение практических заданий сертификационных испытаний по каждой компетенции с учетом оформления, представления комиссии и защиты может занять от нескольких часов до нескольких дней. Поэтому при сертификационных испытаниях допустимо подтверждение умений и навыков как по полному объему компетенций в соответствии с профессиональными функциями, так и по одной или набору компетенций, необходимых для выбранной выпускнику специализации. В некоторых случаях для работодателя и сертифицируемого лица особое значение могут иметь профессиональные функции, связанные с научно-исследовательской работой выпускников или аспирантов. Проверка на предмет оценки их уровня научно-творческих способностей — самостоятельная методическая задача.

В процессе выполнения практических заданий сертификационных испытаний выпускник может использовать всю необходимую литературу, программное обеспечение, технические и иные средства, а также получать консультации специалистов [2].

Например, при сертификационных испытаниях выпускников по специальности «Ракетостроение» для контроля умений и навыков профессиональных действий тестовые задания целесообразно сгруппировать в два блока.

1. «Проектировочный блок» — контроль умений и навыков по профессиональным функциям:

a) участию в разработке теоретических положений, компоновочных чертежей и технологических процессов;

b) участию в работах по анализу маркетинга ракетостроения и проектного менеджмента;

в) участию в проведении работ по конструкторско-технологической отработке производства изделий РКТ и их испытаний.

2. «Расчетный блок» — контроль умений и навыков по профессиональным функциям:

a) участию в проектных расчетах с применением компьютерных технологий;

б) участию в проведении расчетов несущих конструкций аэрокосмической техники, проектировочных расчетах характеристик ЛА и его агрегата.

В «Проектировочном блоке» оцениваются умения и навыки владения 3-D и 2-D моделированием и инструментами, способности к разработке элементов технологических процессов. В «Расчетном блоке» оцениваются умения и навыки владения расчетными методами и инструментами, а также аналитические способности, включая способности использовать в расчетах современное компьютерное математическое обеспечение.

Примером сертификационного задания по «Проектному блоку» могут служить как отдельные задания, так и материалы курсовых проектов, таких как разработка ступени ракетоносителя, разгонного блока или орбитального корабля.

В качестве отдельных заданий могут быть следующие:

разработка трехмерной модели силового элемента шпангоута;

разработка схемы сборки элементов ракетоносителя или КА;

расчет на прочность резьбового соединения, применяемого в технологическом процессе сборки;

разработка трехмерной модели изделия после сборки;

расчет режимов резания на примере изготовления шпангоута.

Сертификационным заданием по «Расчетному блоку» могут служить как отдельное задание, так и материалы дипломного проекта. В качестве отдельных заданий могут быть следующие:

разработка эскизного проекта внешней трехступенчатой ракеты-носителя (РН);

разработка системы аварийного спасения;

разработка программы полета для многоразовых КА;

выполнение расчетов двигательной установки системы аварийного спасения;



выполнение расчетов летно-технических и взлетно-посадочных характеристик многоразового космического аппарата;

расчеты массово-инерционных характеристик РН;

расчеты характеристик устойчивости и управляемости многоразового космического аппарата;

расчеты наработки на отказ ракетоносителя по известным параметрам надежности основных систем.

Таким образом, сертификационное испытание может быть сформировано из одного задания путем разделения его на два блока и множества разделов по данному сертификационному измерению компетенций специалиста и выпускника по специальности «Ракетостроение». Таким образом, варьируя задание, можно получить большое количество «тестовых сертификационных испытаний», не меняя структуры измерений компетенций.

Для обеспечения качества подготовки специалиста нельзя останавливаться исключительно на решении вопросов оценки подготовленности выпускников. При проведении сертификации необходимо уделять внимание и вопросам построения моделей оценки качества, позволяющих осуществлять входной, текущий и итоговый контроль уровня подготовки учащихся с учетом требований работодателя. Элементами такой системы могут, безусловно, стать наработки, сделанные в результате выполнения второго этапа данного проекта. Перспективно введение таких понятий, как: мера «стоимости» контрольного мероприятия, определяемого его трудоемкостью, шкала оценки усвоенных знаний и навыков выпускников; модель пересчета полученных

выпускником оценок в суммарный рейтинг; построение полигонов распределения рейтингов среди сертифицируемых кадров.

Таким образом, можно говорить о такой категории как «конкурентоспособность специалиста», включающая совокупность свойств (знания, умения, инновационные способности, личностные качества и пр.), характеризующихся степенью реального или потенциального удовлетворения специалистами конкретной потребности работодателя по сравнению с другими в рассматриваемой профессиональной области. В целом конкурентоспособность специалиста определяется имеющимися у него преимуществами перед другими специалистами в праве выполнять профессиональные функции на рабочем месте. Конкурентоспособный выпускник — тот, кто обладает конкурентными (по отношению к другому специалисту в профессиональной области) преимуществами, позволяющими ему быстрее и с меньшими затратами времени адаптироваться на рабочем месте, решать прикладные производственные и смежные задачи. Конкурентоспособность — это во многом своеобразная мера качества подготовки выпускников. Именно разработанный научно-методический комплекс измерительных материалов призван выполнить эти задачи. Количественные оценки, полученные в результате его применения, могут быть использованы для управления уровнем подготовки специалистов в вузах технического профиля [3]. Кроме этого, в перспективе необходимо учитывать связь между развитием конкурентных преимуществ специалиста и его личностных качеств, включающих профессиональный интерес, профессиональную пригодность, общекультурную эрудированность и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиновский, А.Л. Перспективы развития системы оценки качества подготовки выпускников технических вузов [Текст] / А.Л. Галиновский, Е.В. Винокурова, Е.И. Пудалова // IV Междунар. науч. заоч. конф. «Актуальные вопросы современной психологии и педагогики». — 21 августа 2010. — Липецк: Изд-во «Де-Фактор», 2-1.— С. 102–103.

2. Галиновский, А.Л. Курсовое и дипломное проектирование [Текст]: учебное пособие / А.Л. Га-

линовский.— МГТУ им. Н.Э. Баумана.— М., 2010.— 62 с.

3. Галиновский, А.Л. Взаимодействие с работодателями, стратегическими партнерами, учебными заведениями технического профиля [Текст] / А.Л. Галиновский, Д.Г. Семиразумов, Е.В. Винокурова // Материалы IV Всеросс. научно-практ. конф. «Российское образование в XXI веке: проблемы и перспективы» 13–14 ноября 2009. Изд-во Томского университета, 2009.— С. 63–67.

УДК 655:655.5:316.77

А.В. Иванов

ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ В МЕДИАПРОСТРАНСТВЕ

Медиапространство сегодня существует везде, где есть возможность принимать теле- или радиосигнал. Наши дети, особенно в мегаполисах, не озабочены тем, где найти интересную книгу, они ищут конкретную информацию либо общаются в интернете. При этом бумажный носитель отходит на второй план. Казалось бы, все это так, но потребление бумаги в мире растет, особенно той, которая предназначена для лазерных принтеров. Причем происходит это достаточно высокими темпами.

Принтер или iPad?

Сегодня принтер стал рядовым офисным явлением, и стоимость его постоянно снижается. Особенно увеличился бумажный документооборот в государственных структурах. Достаточно проанализировать бухгалтерскую и кадровую отчетность, чтобы увидеть: компьютеризация не только не облегчила жизнь людям «государственным», но в несколько раз увеличила бумаготворчество!

В конце прошлого столетия благодаря разработкам военно-промышленного комплекса США появилась «Всемирная паутина» — интернет, которая за исторически ничтожный срок в два с небольшим десятилетия завоевала 2 млрд пользователей! Интернет как коммуникационная платформа сегодня — главный конкурент телевидению, печатным средствам массовой информации и досуга. Так ли это? Возможно, речь идет о новом дополнении к уже существующим технологиям хранения и передачи информации?

Человеческая мысль не стоит на месте: широкое распространение получили ридеры — электронные устройства для чтения книг с экранов, поистине революционным стало внедрение технологии iPad, ведь конвергенции подверглись сразу видео-, аудио- и текстовая информация. Хотя при этом суммарные тиражи бумажных изданий в России и имеют тенденцию к снижению, но еще достаточно прочно удерживают свои позиции.

Выступая с докладом на конгрессе издателей и дистрибуторов США в 2010 году, прези-

дент компании «Конде Наст» Чак Таунсенд заявил, что издатели, находящиеся на передовых позициях, сегодня должны руководствоваться концепцией «издательского дома — 360 градусов», т. е. продвигать контент по всем возможным направлениям и каналам, доступным современному человеку, и превращать издательский бизнес будущего в рекламное агентство полного цикла. Он также сообщил, что значительная часть журналов его издательского дома в настоящее время переведена на технологии iPad и широко представлена в них. В среднем за месяц владельцы iPad скачивают 90 000 копий журналов, выпускаемых «Конде Наст», но большинство из них не отказываются от чтения бумажных версий этих изданий. Таким образом, использование iPad, по сути, позволяет расширить аудиторию и увеличить продажи бумажных версий.

Новый игрок — ридер

Пользователи интернета и участники различных социальных сетей уже сегодня тяготеют к бумажным носителям: журнал, распечатанный из твиттера или блога в ЖЖ, — реальность нашего времени. Психологически читать и обрабатывать информацию с бумажных носителей проще, чем работать с электронными изданиями. На экране можно увидеть один документ, а на столе их можно разложить до сотни и изучать, не напрягая зрение. Однако ридер — электронное устройство для чтения текстов — сегодня бурно завоевывает рынок. Ридеры массово закупаются университетами развитых стран и выдаются студентам с закачанными учебными материалами.

Когда я покупал ридер в начале 2010 года, мне представлялась обновленная усовершенствованиями жизнь интеллигента, который имеет возможность благодаря одному устройству весом 160 граммов пользоваться библиотекой в 12 000 полнообъемных книг. В интернете множество доступных файлов, и если даже это платный файл, то стоимость его — не более 50 рублей. При этом книги вполне презентабельны, размер шрифта



можно менять по желанию и увеличивать до любых размеров для слабовидящих. Прошел год — лидер я использовал только пару раз в поездках. Но за это же время я прочитал семь обычных бумажных книг и достаточное количество статей в журналах.

Об экономике вопроса и не только

Многие считают, что век полиграфии скоро закончится. Цифры продаж iPad 2 поражают воображение. Очередь за «великим» изобретением выстроилась даже в США на месяц вперед. Но... «продвинутые» американцы воспринимают пользующийся такой популярностью компьютер как новую игрушку. Да, iPad способен поддерживать высококачественное полноцветное изображение, обеспечивать беспрерывную работу в течение девяти часов, взаимодействовать со «Всемирной паутиной», «крутить» фильмы на пока еще маленьком экране и качественно воспроизводить музыку. Однако «эффект присутствия», который нам дарит хорошая книга или фильм, для него не достижим. Помимо этого, набор текста и его редактирование — процессы, над которыми Стиву Джобсу еще предстоит поработать.

Техническая революция в области информационных технологий еще не достигла своего апогея по-ленински, когда «верхи не могут, а низы не хотят» жить, как прежде, — не готов человеческий разум к полному переходу на электронные формы представления информации, особенно информации для досуга — чтения! Теоретически легко представить человечество, пользующееся только электронными способами передачи информации, но практически все не так-то просто: экономика и психология чтения — главные препятствия для новых технологий.

Еще один немаловажный психофизиологический аспект: сколько информации может обработать за определенный интервал времени мозг среднестатистического человека? Нужно ли ему владеть такими огромными массивами данных, которые закачиваются в обычный ноутбук? Только 0,5 % населения планеты рождаются с повышенными умственными способностями, и им действительно необходима солидная информационная подпитка. Рядовой пользователь сегодня не ушел дальше, чем сто лет назад его предшественник, в своей потребности обрабатывать повседневную рутинную новостную ленту окру-

жающего мира. Ему не требуется столько, сколько сегодня предлагает нам медиаэфир, ему нужна одна книга, один фильм в конкретный промежуток времени.

А мировой трафик интернета к 2014 году вырастет более чем в четыре раза и составит 767 млрд Гбайт — прогнозирует производитель сетевого оборудования «Cisco Systems Inc» — главным образом за счет растущей популярности видео- и социального общения. Для просмотра всей видеинформации, которая будет скачана пользователями в 2014 году, потребуется 72 млн лет, сообщает «Reuters».

Приведенные цифры иллюстрируют тот факт, что бумажный носитель был своего рода цензором, который в силу технических и экономических причин удалял информационный «спам».

Ксерокс сдавать позиции не собирается

22 октября 1938 года американский изобретатель Честер Карлсон и немецкий физик Otto Корней в отеле «Астория» (штат Нью-Йорк) получили первое ксерографическое изображение способом сухого электростатического переноса. Эта дата, по-существу, является днем рождения цифровой печати. Через десять лет состоялась публичная демонстрация копировального аппарата «Xerox Model A», выпущенного компанией «Галоид». Популярность копира превзошла все ожидания, и в 1961 году компания «Галоид» была переименована в «Ксерокс». Благодаря изобретению Ч. Карлсона был решен технический вопрос копирования бумажных документов; принцип электрофотографии позже был использован при создании лазерных принтеров для распечатки цифровых текстов с персонального компьютера. Именно это изобретение стало основой для построения периферийных печатающих устройств. В дальнейшем данный способ печати занял мощный сегмент на рынке полиграфического производства.

Появление в конце XX века новой технологии, стартовавшей как электронное печатное устройство для распечатки текстов и графических изображений, взорвало мир традиционной печати! Стоит отметить, что технология, названная цифровой печатью, развивается очень интенсивно. По прогнозам Pira International рост производства цифрового печатного оборудования к 2014 году составит 113,9 %, что в разы превышает темпы прироста производства оборудования по другим видам печати.

Возможности «цифры» — так именуют цифровую печать профессионалы-полиграфисты — по сути схожи с интернет-контентом. И в том, и в другом случаях мы имеем дело с файлами, которые достаточно быстро конвертируются в приемлемый для печати формат. Скорость печати практически мгновенна и занимает считанные минуты. Единственный вопрос — это стоимость отпечатка. Сегодня большой процент населения имеет домашний принтер и предпочитает распечатывать тексты на нем, хотя стоимость этого отпечатка намного выше отпечатка, полученного промышленным способом.

Аналитики считают, что без бумаги в обозримом будущем нам не обойтись. Она останется основным носителем (возможно, постепенно вытесняемым) как для глянцевых журналов, так и для книг. Цифровые технологии вряд ли заменят бумагу окончательно — вопросы удобства пользования, элитарности и престижа здесь играют далеко не последнюю роль. В России объем потребления бумаги и картона на душу населения в 2009 году составил 42,4 кг (79,6 % к 2008 году), тогда как в экономически развитых странах уровень потребления значительно выше: в Финляндии — 330 кг, Швеции — 295 кг, Германии — 226 кг.

Есть еще и чисто экономические причины, которые не позволяют вооружить все человечество планшетниками и ридерами. Сегодня они доступны лишь достаточно обеспеченным и «продвинутым» пользователям. Выход в Сеть имеют 71 % жителей развитых государств и 21 % — развивающихся, а домашний интернет — соответственно 63 и 13,5 %. Если предположить, что 12 млн ежедневных посетителей социальной сети «В контакте» завтра захотят купить iPad, то им потребуется 8,4 млрд долларов, что в шесть раз превысит объем рекламного дохода российских СМИ в 2010 году! Особо следует отметить — весь годовой оборот полиграфической промышленности России в 2009 году составил 6,69 млрд долларов.

Здесь уместно вспомнить об изобретении печатного станка И. Гутенбергом в 1445 году. Технология печати развивалась четыре века. И не было ни литературного бума, ни массового чтения как формы досуга, пока в начале XIX века не был освоен промышленный отлив бумаги. Эта технология позволила сделать книгу, а точнее, стоимость бумаги доступной массовому потреби-

телей. Именно XIX век дал миру плеяду авторов-классиков во всех странах! Однако как в средневековой Германии, так и сегодня очень важно уметь правильно применять и, главное, сопровождать прогрессивные технологии.

Маркетинговое острье «цифры»

Консультативный совет клиентов высшего образования (КСКВО) корпорации «Ксерокс», на котором мне была предоставлена возможность сделать доклад на тему «Университетское цифровое книгоиздание: российские перспективы», достаточно подробно разбирал проблемы всеобщей цифровизации и печатной реальности. Не покидало ощущение глобальных перемен. В какой форме и с помощью каких технологических платформ будет передаваться и поступать информация? Останется ли книга на бумажном носителе? Как использовать мировой инфоСурс с помощью цифровых печатных систем?

Несомненно, поразил подход корпорации «Ксерокс» в США к своим пользователям в системе университетской печатной индустрии. Эд Даниельчак — руководитель отдела маркетинга — постоянно собирает на специальные встречи менеджеров вузов, использующих цифровые технологии печати. Участники встреч, характеризующихся узкой специализацией с достаточно мощным обзором ситуации в сфере обращения информации в университетской среде, обсуждают новые технологии, технические новинки и изучают тренды развития рынка.

Джон Конлей, специалист «Ксерокс», презентовал Эспрессо Бук Машин (ЕБМ), которая за четыре минуты в любом месте земного шара распечатывает любую книгу до 800 страниц в переплете библиотечного качества из единого хранилища, насчитывающего 3 млн записей, — Domain Google Books (доступ предоставлен Ingram Lighting Source). Машина проводит мониторинг загружаемых книг и производимых оплат с целью учета. Применительно к неанглоязычным странам, видимо, будет предусмотрен свой информационный портал. В названии «эспрессо» кроется намек на аналогию с кофейным автоматом — загрузил зерна, налил воду, выбрал продукт и через пару минут получил напиток!

Машина занимает площадь около двух квадратных метров и требует постоянного подключения к интернету со скоростью 10 Мбайт/с. Производительность ЕБМ — до 40 000 книг в год,



причем предусмотрено изготовление полноцветных обложек: для этих целей в состав оборудования встроен струйный принтер Epson Color Ink Jet Cover Printer. Данная технология будет востребована вузами и библиотеками, но насколько она адаптирована к российским реалиям? Стоимость, запуск в эксплуатацию, обслуживание, сервисное обеспечение, интеграция в книжную базу данных — вопросов достаточно много. Но, пока продажи в Российской Федерации еще не стартовали, есть время для их осмысления и решения.

Цифровая печать в социальных сетях — услуга, которая, как ожидает Петер Муир, президент Bizucate, будет развиваться на рынке. На сколько технология изучена и востребована в России — вопрос отдельный, но в развитых странах она становится популярной. Каждый желающий может заказать и распечатать свой блог, подборку материалов из социальных сетей по определенной тематике и т. д. Здесь есть, на мой взгляд, серьезная нерешенная проблема, связанная с авторским правом: пользователь, публикующий свой материал в интернете, по умолчанию не претендует на имущественные авторские права. В отличие от автора, выпускающего свою книгу через издательство, автор блога имеет право только на имя (на цитирование) и не более того. Не секрет, что основная проблема глобального перевода всех текстовых материалов в цифровой вид и обеспечение к ним доступа — проблема имущественная, связанная с получением гонорара. Именно эта причина не позволяет сформировать единую глобальную библиотеку современных авторов и их наследников.

Университетское учебное книгоиздание и его развитие с применением цифровых печатных технологий — отдельная тема для обсуждения на КСКВО. Именно здесь есть действительно прорывные возможности и именно здесь успех несомненен! Компоновка текстов, построение учебных материалов под специальные аудитории, использование технологии печати с переменными данными и, самое главное, — почти мгновенная распечатка бумажной версии для любой аудитории — такой подход универсален именно в среде университетского книгоиздания. Данные инсталляций оборудования свидетельствуют о многом — только за последние пять лет в Российской Федерации 65 университетов приобрели пакеты цифрового печатного оборудования.

Перспективы «цифры» в университетском книгоиздании

Следует отметить, что в России пока еще не структурированы и четко не обозначены, как в США, те задачи, под которые приобреталась тяжелая цифровая техника. Менеджеров американских университетских типографий поразил факт недостаточной загрузки оборудования в нашей стране. Сравнивая объемы полиграфического производства в долларовом эквиваленте, можно сделать вывод, что даже в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете оборудование «слегка» пристаивает при практически равных затратах. Здесь необходимо сразу же уточнить, что вуз в США является основным заказчиком печатных услуг. Именно вуз формирует пакет заказов на «цифру» и финансирует его! Этот пакет состоит из огромного количества: писем абитуриентам, студентам и выпускникам с персонификацией данных; рекламной продукции различного содержания; малотиражных книг для учебного и научного процессов. Большой объем материалов разового использования — почитал и выбросил. Поэтому не удивительно, что приведенные цифры потребления бумаги в России — в пять-семь раз ниже, чем в развитых странах!

Можно констатировать следующее. Рынок цифровой печати в среде отечественного университетского книгоиздания находится еще в стадии формирования и во многом зависит от макроэкономической ситуации в стране. Такие факторы, как политика Министерства образования и науки или отсутствие ее, во многом определяют политику управления в вузах на местах. Если раньше книгоиздательской и библиотечной деятельностью в университетской среде занималось специальное Управление учебного книгоиздания, библиотек и медиатек в министерстве, то после его расформирования в течение пяти лет нет ни одной ответственной за данное направление структуры. В условиях достаточно жесткой вертикали власти в стране надеяться, что в государственном секторе образования будут работать рыночные механизмы, представляется необоснованным. Рынок действует по иным законам, не имеющим точек соприкосновения с современной государственной системой высшего образования Российской Федерации.



Изменения в государственной политике налицо. И не только в области управления книгоизданием. Де-факто уже сейчас страна живет по иным законам, которые де-юре еще предстоит прописать.

Сегодня мы являемся очевидцами глобальной информационной революции. Помимо традиционных базовых знаний, уже завтра подрастающее поколение в школе будут учить технологиям ориентации в информационном пространстве. Да, книга есть и книга будет, в каком бы формате она представлена ни была — в электронном или бумажном. Но уже сейчас копилка мирового знания переполнена до краев, а процесс имеет тенденцию к росту. Глобальная сеть интернета — это мощнейший маршрутизатор в потоке текстовых, звуко- и видеосообщений. По экспертной оценке

компании Primir объем цифровой печати в 2020 году достигнет почти 700 млрд страниц! То есть увеличится более чем в два раза по сравнению с сегодняшним днем.

Будет ли книга заменена электронным изданием, исчезнет ли совсем — рассуждать на эту тему сегодня бессмысленно. Мировые технологии и экономика производства электронных устройств для чтения пока еще не способны кардинально изменить ситуацию. Внедрение цифровых печатных систем значительно отдалило решение кардинального вопроса — какой будет книга завтра: бумажной или электронной? Сколько бы дискуссий ни развертывалось на медийную тематику — все они ведутся с помощью печатного слова. А это — серьезный аргумент в пользу «твердой копии»!

ХРОНИКА СОБЫТИЙ

УДК 001:66

ВАСИЛИЙ РОМАНОВИЧ ОКОРОКОВ

(к 75-летию со дня рождения)

23 апреля 2011 года исполнилось 75 лет научному руководителю МВШУ, заведующему кафедрой «Международные экономические отношения» доктору экономических наук профессору Василию Романовичу Окорокову.

В.Р. Окороков поступил в Ленинградский политехнический институт (ЛПИ) им. М.И. Калинина в 1954 году, который с отличием окончил в 1959-м, получив квалификацию инженера-экономиста по специальности «Экономика и организация энергетики».

В сентябре 1959 года стал работать инженером-электриком в институте «Гипронефтестрой» в г. Куйбышеве. В мае 1960 года был приглашен на преподавательскую работу в Куйбышевский индустриальный институт, работал ассистентом и, позднее, доцентом кафедры «Экономика и организация производства».

В октябре 1961 году был приглашен профессором В.В. Болотовым в аспирантуру ЛПИ, которую закончил в 1964 году, получив ученую степень кандидата технических наук.

С ноября 1964 года деятельность В.Р. Окорокова связана с Политехническим институтом (университетом). Здесь он работал младшим научным сотрудником, ассистентом, доцентом, профессором, заведующим кафедрой «Научные основы управления», организованной по его инициативе и существующей по настоящее время чс несколько измененным названием.

В мае 1974 года Минобразования РСФСР назначило В.Р. Окорокова на должность проектора по научной работе ЛПИ, в которой он проработал до сентября 1986 года. В эти годы В.Р. Окороков проявил свой недюжинный талант управленца и организатора. По его инициативе были сформулированы и реализованы на практике принципы подготовки в ЛПИ специалистов широкого профиля, которые позволили его выпускникам успешно работать в быстро меняющихся условиях производственно-хозяйственной деятельности. Подготовка на основе этих принципов специалистов широкого профиля особенно

пригодились выпускникам ЛПИ в бурные годы перехода к новой системе экономических отношений в стране, когда многим из них пришлось менять не только специальность, но и сферу деятельности, становясь банкирами, менеджерами, политиками и др.

Будучи проректором ЛПИ, В.Р. Окороков активно поддерживал структурные преобразования в институте, направленные на подготовку специалистов, отвечающих требованиям времени. При его активной поддержке в институте были созданы новый факультет — технической кибернетики, в настоящее время один из ведущих факультетов Политехнического университета, а также несколько новых кафедр, в частности кафедры научных основ управления, психологии управления и др.

В сентябре 1986 года В.Р. Окороков был направлен Академией наук СССР на работу в Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА), где руководил исследова-



тельским проектом «Интегрированные энергетические системы», а позже исполнял обязанности ученого секретаря МИПСА. Итогом работы В.Р. Окорокова в этом институте стали новые подходы к использованию энергетических ресурсов в мире, направленные не только на получение конечных видов энергии, но и на сохранение окружающей среды и обеспечение устойчивого развития человечества.

В этот период В.Р. Окороковым было организовано более десяти международных конференций, в работе которых принимали участие многие ученые и специалисты нашей страны, получившие доступ к новой информации и имевшие возможность установить творческие связи с учеными других стран.

Вернувшись в 1991 году в родной институт, ставший к тому времени университетом, В.Р. Окороков организовал на электромеханическом факультете новую кафедру — «Энергосбережение и электрофициация» — и открыл на ней две новые специальности по подготовке инженеров-электриков, существующие в настоящее время, выпускники которых пользуются большим спросом со стороны отечественной электроэнергетики. В апреле 1994 года по инициативе В.Р. Окорокова в университете была организована Российско-Американская высшая школа управления (РАВШУ), позже переименованная в Международную высшую школу управления (МВШУ), руководителем (директором) которой он был в течение 16-ти лет.

МВШУ СПбГПУ в настоящее время — одно из эффективных структурных подразделений Политехнического университета, выпускники которого успешно работают как на отечественных, так и на зарубежных предприятиях.

Наряду с успешной организационной и педагогической деятельностью профессор В.Р. Окороков активно занимался и научно-исследовательской работой. Начиная с 1962 года, когда вышла из печати его первая статья, он участвовал в развитии теории и методов системных исследований в энергетике, многоцелевого подхода при решении оптимизационных задач выбора структуры генерирующих мощностей, в анализе эффективности технических решений в народном хозяйстве. В.Р. Окороковым сформулированы и развиты новые научные направления по оптимизационным расчетам в энергетике, моделированию и управлению сложными электроэнергетическими системами, адаптивным методам управления производственными системами,

по управлению НИР, ОКР и нововведениями в экономических системах.

Основные этапы научной деятельности профессора В.Р. Окорокова характеризуются следующими результатами:

1961–1967 годы. В этот период В.Р. Окороковым впервые в СССР были предложены технико-экономические принципы и методы статистической теории координации изоляции линий электропередачи и силовых трансформаторов высших классов напряжения. Итогом этой работы стала диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Технико-экономические вопросы выбора изоляции линий электропередачи высших классов напряжения», успешно защищенная в 1964 году, и коллективная монография «Внутренние перенапряжения в электрических сетях высокого напряжения переменного тока» под редакцией М.В. Костенко.

С сентября 1967 года по май 1968-го В.Р. Окороков находился на научной стажировке в Университете г. Торонто (Канада).

1968–1977 годы. В этот период основным направлением научной работы В.Р. Окорокова была теория технико-экономических принципов и методов оптимального управления развитием и эксплуатацией сложных производственных систем, преимущественно электроэнергетических, включая развитие общей теории управления, методов выбора структуры систем, оптимальных режимов их работы, а также методов прогнозирования и планирования научно-технического прогресса.

Итогом этой работы стала диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук на тему «Технико-экономические принципы и методы управления развитием и эксплуатацией электроэнергетических систем и их элементов», успешно защищенная в 1973 году, а также индивидуальные и коллективные монографии «Управление электроэнергетическими системами», «Надежность производственных систем», «Экономика и организация энергетического хозяйства СССР» (в соавторстве), «Экономика передачи электрической энергии» и др.

В 1977 году В.Р. Окороков находился в течение двух месяцев на научной работе в Слоуновской школе бизнеса Массачусетского технического института, где изучал методы моделирования сложных систем и методы системной динамики, разработанные профессором Д. Форрестором.



1978–1985 годы. Основными научными направлениями работы В.Р. Окорокова в этот период были теория и методы системных исследований в энергетике и методы управления научно-техническим прогрессом в сложных экономических (производственных) системах. В частности, одним из основных способов исследования сложных систем и их управления является моделирование. Под руководством профессора В.Р. Окорокова были развиты многоцелевые экономико-математические имитационные модели, которые находят широкое применение при прогнозировании развития сложных экономических систем, выборе организационных структур управления ими, при управлении научными исследованиями и разработками и т. п.

Итогом этой работы стали коллективные монографии «Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике», «Проблемы энергосберегающих нововведений и эффективности промышленного производства» и др., а также несколько монографий, написанных учениками В.Р. Окорокова, где он был научным редактором.

1986–2010 годы. В этот период основное научное направление исследований В.Р. Окорокова, которое продолжается и в настоящее время, — это прогнозирование возможности новых энергетических технологий и их влияния на устойчивое развитие человечества. В итоге этой работы появились монографии «Интегрированные энергетические системы — мост в будущее» (1990 г.) и «Энергетические технологии и мировое экономическое развитие: прошлое, настоящее, будущее» (2010 г.) — и более двенадцати других научных монографий.

Параллельно с указанными научными направлениями профессор В.Р. Окороков опубликовал большое количество учебных пособий и статей по проблемам управления высшей школой, подготовки кадров и управления учебным процессом. Общее количество научных работ профессора В.Р. Окорокова превышает 450 наименований, в их числе более 45 книг, монографий, учебников и учебных пособий.

В 1984 году профессор В.Р. Окороков находился на научной работе в Манчестерском политехническом институте и в Манчестерской школе бизнеса, где изучал методы управления новыми технологиями и прогнозные тенденции развития энергетики Великобритании.

В.Р. Окороков проводит большую организационно-научную работу. Он был членом Научно-

го совета по комплексным проблемам энергетики АН СССР и РАН; членом Научного совета по проблемам научно-технического и социально-экономического прогнозирования АН СССР и ГКНТ СМ СССР; членом Научно-технического совета Министерства энергетики и электрификации СССР; членом Президиума и председателем бюро секции промышленной энергетики и экономики энергетики Центрального правления НТО энергетики и электротехнической промышленности имени Г.К. Кржижановского; членом Президиума Научно-методического совета по экономике, организации и управлению промышленностью строительством, членом Совета по планированию и прогнозированию потребности в специалистах Министерства высшего и среднего специального образования СССР, членом научно-технического совета НИИВШ; председателем головного Совета по планированию и экономике высшего образования, а также председателем секции подготовительных факультетов научно-методического Совета по работе с иностранными учащимися Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР; членом группы экспертов ВАК СМ СССР; председателем и членом специализированных Советов по присуждению ученой степени доктора экономических наук.

В 1984 году профессор В.Р. Окороков по предложению делегации СССР избран на Генеральной сессии Международной комиссии по большим электрическим системам (СИГРЭ) постоянным членом от СССР в исследовательском комитете СИГРЭ № 37 «Планирование развития энергосистем».

В своей деятельности В.Р. Окороков поддерживает тесные связи с промышленностью, отраслевыми и академическими НИИ и КБ (Энергосетьпроект, Теплоэлектропроект, Гидропроект им. С.Я. Жука, СЭИ СО АН СССР, СибНИИЭ, институты по проектированию и разработке новой энергетической техники и технологии, НИИПТ и др.).

В.Р. Окороков был организатором более 50 крупных международных и всероссийских научно-технических совещаний и конференций по системным исследованиям в энергетике, а также по проблемам развития отечественной экономики.

За годы работы В.Р. Окороков подготовил 12 докторов наук и более ста кандидатов наук, а также непосредственно руководил подготов-

кой более тысячи инженеров и специалистов. Кандидаты наук и инженеры, подготовленные профессором В.Р. Окороковым, работают в научных и учебных заведениях Сибири, Дальнего Востока, Москвы и Санкт-Петербурга, в странах Средней Азии, а также во многих зарубежных странах.

В.Р. Окороков известен в СССР и за рубежом как крупный ученый-энергетик и специалист в области управления общественным производством и наукой.

Ректорат СПбГПУ и редакционный совет журнала поздравляют юбиляра и желают ему дальнейших творческих успехов.

УДК 620:621

О.В. Баранова

В ПЕТЕРБУРГЕ РЕШАЮТ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

15 марта в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете состоялось совместное заседание Научно-технического совета (НТС) при Правительстве Санкт-Петербурга и Объединенного научного совета по проблемам энергетики при Президиуме Санкт-Петербургского научного центра РАН.

На заседании рассматривалась реализация в нашем городе политики энергосбережения. В работе совместного заседания приняли участие Председатель совета ректоров Санкт-Петербурга **В.Н. Васильев**, Председатель Комитета по науке и высшей школе **А.С. Максимов**, Президент Союза промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга **А.А. Турчак**, председатель Объединенного научного совета по проблемам энергетики при Президиуме Санкт-Петербургского научного центра РАН, ректор СПбГПУ **М.П. Федоров**, президент СПбГПУ академик **Ю. С. Васильев**, президент и научный руководитель ЦНИИ КМ «Прометей» **И.В. Го-рынин**, директор Института электрофизики и электроэнергетики РАН академик **Ф.Г. Ругберг**, директор НПК «Механобр-Техника» **Л.А. Вайс-берг**, другие известные ученые. Вел заседание председатель НТС академик **В.А. Глухих**.

Открывая заседание, академик Глухих подчеркнул, что задача НТС — «найти место науке в любом процессе». Приводим его вступительное слово практически без купюр:

«Вопрос энергосбережения — сложный и запутанный. Вроде, были программы, политика Правительства ясна, работа в области энергосбережения ведется. Однако и у научных работ-

ников, и у руководителей предприятий удовлетворенности от этого нет. Этому есть несколько причин, но мы считаем, что основная причина — не хватает мероприятий для реализации этой политики. С другой стороны, разные отрасли, которые должны реализовывать эти программы, по-разному заинтересованы в этом процессе. Промышленники, конечно, заинтересованы в этом в первую очередь, но такое впечатление, что у производителей энергии такой заинтересованности нет. Я это говорю не только как представитель научного сообщества, но и как представитель бизнеса. Здесь присутствуют не только члены научно-технического совета, но еще и представители промышленных предприятий, и они «на своей шкуре» все это чувствуют. Поэтому хотелось бы сегодня обсудить все эти вопросы, может быть, предложить какие-то конкретные мероприятия... хотелось бы найти способы, как лучше сплотить науку, экономику и энергетику, чтобы нашему городу было от этого хорошо».

Председатель Объединенного научного совета по проблемам энергетики при Президиуме Санкт-Петербургского научного центра РАН, ректор СПбГПУ **М.П.Федоров** в кратком докладе подчеркнул необходимость анализа эффективности политики энергосбережения и, соответственно, ее своевременной коррекции.

«Россия оказывается в неблагоприятной ситуации из-за сравнительно высокой энергоемкости производств, что сказывается на снижении инвестиционной составляющей ВВП. Значительные затраты на энергетику снижают



объем свободных средств на инновационное развитие», — сказал ректор СПбГПУ. «Высокая себестоимость товаров и услуг обусловлена высокой стоимостью энергии. А это приводит к снижению конкурентоспособности российской продукции на мировых рынках».

С докладами выступили заместитель председателя Комитета по энергетике и инженерному обеспечению **С.А. Мельникова**, директор Северо-Западного филиала Агентства по прогнозированию балансов в электроэнергетике **В.Л. Гришина**; генеральный директор ОАО ТГК-1 **Б.Ф. Вайнзихер**, председатель Совета директоров группы компаний «Энергетическая безопасность» ученый секретарь секции «Энергетика» НТС при Правительстве Санкт-Петербурга **Н.Н. Дзекцер**.

В своем выступлении «Цели и задачи политики энергосбережения в Санкт-Петербурге, принятые и подготавливаемые решения» С.А. Мельникова рассказала о проводимой в городе политике энергосбережения. Основными заявленными целями этой политики являются обеспечение энергетической безопасности Санкт-Петербурга, обеспечение рационального и экологически ответственного использования энергии и энергетических ресурсов, снижение энергоемкости валового регионального продукта на 40 % по сравнению с 2007 годом. По данным Комитета по энергетике и инженерному обеспечению, сегодня в Санкт-Петербурге нет ни одного работающего возобновляемого источника энергии, они в северной столице практически неприменимы. Практически отсутствует энергоаудит объектов городского хозяйства.

В.Л. Гришина, выступившая с докладом «Механизмы реализации энергосбережения», ознакомила участников заседания с положением дел в области правового и нормативного обеспечения программы энергосбережения.

По данным В.Л. Гришиной, Петербург первым из российских городов подготовил закон об энергоэффективности. Согласно законопроекту Петербург — единная энергетическая территория (в отличие от Москвы, где каждый округ работает по собственной энергетической программе). По мнению Гришиной, сейчас необходимая мера — разработка и внедрение отечественного оборудования с высокими показателями энергоэффективности.

К слову сказать, первый пункт Федерального закона № 261 запрещает оборот энергорасточительных товаров. В первую очередь к ним относятся пресловутые лампы накаливания. Уже сейчас запрещены госзакупки ламп накаливания, т. е. получается, что законодательный запрет стал реально работающим механизмом. Правда, пока только относительно одного из 10 положений ФЗ. Но первые шаги уже сделаны.

Коснулась Вера Львовна и такого важного на сегодняшний день вопроса, как рынок энергосервисных услуг. По ее словам, сейчас нет ни одного энергосервисного договора, и в скором времени собственникам (в первую очередь жилья) придется заключать множество отдельных договоров с каждой управляющей компанией (ТЭК, «Водоканал» и пр.) На практике это означает, что счета за обслуживание жилых домов на электричество, тепло, водоснабжение и прочее петербуржцы будут получать от каждой организации отдельно. И можно только догадываться, как это повлияет на благосостояние горожан.

В.Л. Гришина также подчеркнула, что законодательно использование возобновляемых источников энергии в Санкт-Петербурге и Ленобласти крайне ограничено — по сути, нет закона, который определял бы порядок использования нетрадиционных источников энергии. В то же время петербургские ученые (к примеру, на кафедре «Возобновляющиеся источники энергии и гидроэнергетики» СПбГПУ) уже давно разрабатывают проекты по использованию возобновляемых источников энергии (таких, как солнце и ветер).

Б.Ф. Вайнзихер, гендиректор ТГК-1, в докладе «Новое в технологиях энергопроизводства» рассказал о проектах, реализуемых в компании. В первую очередь это — программа сокращения числа котельных и переключение их на теплосети от электростанций ТГК-1. Вайнзихер заявил, что через 4 года в Адмиралтейском районе Петербурга будет на 100 котельных меньше: из 144 котельных останется 47. «Представьте, на 100 труб меньше видно с Исаакиевского собора! Уже одно это стоило, чтобы этим проектом заниматься».

По расчетам экспертов ТГК-1, благодаря реализации этой программы в Санкт-Петербурге будет тратиться на 800 млрд кубометров газа

в год меньше, а бюджетная экономия составит около 2 млрд рублей в год. Первыми (уже в этом году) будут закрыты 1-я Кировская и 1-я Московская котельные. По словам Вайнзихера, в целом эта программа дает экономию 5 млрд кубометров газа за 10 лет — при условии, что ее реализация начнется в 2011 году.

Председатель Совета директоров группы компаний «Энергетическая безопасность» Наум Наумович Дзекцер в своем сообщении «Энергоаудит — необходимый и эффективный инструмент энергосбережения» рассказал о сложившейся ситуации в области энергетических обследований предприятий.

«Закон очень далек от совершенства. В нем практически не упоминаются вопросы экологии. Но решать вопросы энергосбережения без решения экологических проблем невозможно! К примеру, мы знаем очень хорошие технологии в алюминиевой промышленности, которые позволяют снизить энергоемкость продукции. Но они приведут к дальнейшей гибели окружающей среды в районе алюминиевых заводов», — сказал Дзекцер.

По его словам, большой мотивацией для проведения энергоаудита были отчисления для предприятия в размере 10 % от стоимости аудита (эта программа работала в Петербурге с 1996 года). «Наука должна помогать менеджменту, а у нас фактически развален энергетический менеджмент предприятий. Самый большой недостаток закона — плохо прописаны механизмы внедрения этих мероприятий. Мы создаем программу, но нет службы, которая будет отслеживать реализацию мероприятий», — подытожил Н.Н. Дзекцер.

После обсуждения докладов был подготовлен проект «Решения совещания». В этом документе сформулированы проблемы реализации политики энергосбережения и изложены рекомендации для их решения. Так, говорится о том, что в Санкт-Петербурге, как и во всей стране, отсутствует социальная пропаганда экономии энергоресурсов. Практически не уделено внимания вопросам экономического стимулирования энергосбережения в ФЗ № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической безопасности». Нет разделов, посвященных проблемам энергосбережения, в школьных и вузовских учебных программах. Наконец, отсутствуют поощрительные рычаги для организаций, успешно внедряющих энергоэффективные технологии, достижения науки и техники, новые инновационные предложения.

Участники заседания рекомендовали городскому правительству разработать с участием НТС при Правительстве Санкт-Петербурга, Северо-Западного научного центра РАН и Союза промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга «Концепцию системной реализации требований Федерального закона № 261 от 23.11.2009 г. на объектах бюджетной сферы и государственных учреждений Санкт-Петербурга». Предполагается, что в Концепции будут прописаны все меры: от проведения энергетических обследований (энергоаудит) до контроля за реализацией мероприятий Программы энергосбережения.

Кроме того, члены НТС считают необходимым при организации конкурсов научно-технических и инновационных проектов отдавать приоритет энергосберегающим технологиям. Предложено также разработать план мероприятий по пропаганде среди населения Санкт-Петербурга экономии энергоресурсов.

От автора

Невозможно говорить о проблемах энергосбережения в отдельно взятом городе, не учитывая опыт и пример других стран. В соседней Финляндии, к примеру, Правительство в 2010 году решило активизировать работу по повышению эффективности энергопотребления. Еще раньше начала действовать программа по контролю потребления энергии на промышленных предприятиях и в сфере обслуживания. При этом государство субсидирует 50 % затрат на проведение этой программы.

Главная тенденция последнего времени в финском строительстве — повышение энергоэффективности домов. В соответствии с Directive ЕС по энергоэффективности зданий к 31 декабря 2020 года все новые дома должны будут иметь «почти нулевое потребление энергии». Примером для них должны стать государственные и муниципальные учреждения (они перейдут на нулевое потребление энергии уже в 2018 году). В идеале пассивный дом — это независимая энергосистема, вообще не требующая расходов на поддержание комфортной температуры. Пассивный дом должен отапливаться благодаря теплу, выделяемому живущими в нем людьми, бытовыми приборами и альтернативными источниками энергии. Горячая вода получается за счет установок возобновляемой энергии, например тепловых насосов или солнечных коллекторов.



К 110-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ И НАЧАЛУ ЗАНЯТИЙ В СПБГПУ

В.И. Скуратов

ПЕРВЫЕ ШАГИ ПОПЕЧИТЕЛЬСКОГО СОВЕТА

В соответствии с Уставом СПбГПУ Ученый совет 15.12.2003 принял решение о создании Попечительского совета (ПС) СПбГПУ и утвердил его Положение. ПС создан с целью содействия университету в осуществлении его уставной деятельности, а также для оказания помощи в решении актуальных задач развития.

Приказом ректора № 91 от 12.03.2004 назначена рабочая группа для проведения организационной работы по созданию Попечительского совета (руководитель — президент СПбГПУ академик РАН Ю.С. Васильев), определены его место пребывания (здание НТКЦ) и срок начала работы.

На заседании рабочей группы 02.04.2004 сформирован первичный состав ПС в количестве 7 человек, а на состоявшемся в этот же день общем собрании Попечительского совета был избран его председатель (Ю.С. Васильев), два заместителя (В.Н. Бусурин, А.И. Федотов — советники ректора) и секретарь (В.И. Скуратов — помощник президента).

В дальнейшем число членов ПС возросло до 29 человек, было избрано Правление, рабочая группа и контрольно-ревизионная комиссия.

Основными направлениями в работе ПС стали: организация функционирования ПС, оказание спонсорской помощи университету, взаимодействие с организациями, объединяющими выпускников-политехников и решение отдельных вопросов деятельности университета.

При организации функционирования ПС была проведена работа по обеспечению рабочих мест необходимым оборудованием, средствами связи и интернетом. Установлена охранная сигнализация и горячее водоснабжение, изготовлена необходимая документация. Для финансового сопровождения деятельности ПС создан Благотворительный фонд «Содействие развитию СПбГПУ». Привлечены к членству в ПС 39 руководителей организаций и предприятий (выпускники-политехники), из них двое — государ-

ственные служащие, 5 человек — сотрудники СПбГПУ, 30 человек — руководители предприятий, двое — ректоры вузов.

В состав Попечительского совета вошли такие значимые лица, как И.И. Клебанов — полномочный представитель президента РФ по Северо-Западному федеральному округу; М.Э. Осеевский — вице-губернатор Санкт-Петербурга, В.А. Лапота — президент Ракетно-космической корпорации (РКК) «Энергия» имени С.П. Королева и др.

Создана и доведена до факультетов университета база данных на 200 выпускников-политехников — руководителей организаций и предприятий.

Систематически, два раза в год, издается печатный орган ПС — журнал «Новости», который распространяется по факультетам СПбГПУ и заинтересованным организациям.

Одним из важных направлений в работе ПС стало оказание спонсорской помощи университету как членами ПС, так и просто выпускниками-политехниками.

За период деятельности ПС университетом было получено: на ремонт помещений — 21 800 тыс. руб., на учебно-материальную базу — 31 200 тыс. руб., на стипендии и другие цели — 8 840 тыс. руб.

Так, на энергомашиностроительном факультете в Главном здании отремонтированы 3 больших аудитории на сумму 5 100 тыс. руб.: лекционная ауд. 215 (300 м^2) с заменой паркета и мебели, ауд. 315 (330 м^2) для курсового и дипломного проектирования, лекционная ауд. 305 (220 м^2).

Кроме того, отремонтированы все помещения ректората и ауд. 313. Получены две лабораторные установки: аппаратура для диагностики двигателей автомобилей для кафедры ДВС (1 600 тыс. руб.); стенд для диагностики тормозной и других систем автомобиля для кафедры КГМ (1 200 тыс. руб.)

На факультете технологий и исследования материалов отремонтировано общежитие № 12 на ул. Хлопина 13/1 (2 млн руб.)

Приобретена установка для моделирования пластической обработки металлов (15 млн руб., софинансирование), реконструированы 3 лаборатории (2 100 тыс. руб.): лаборатория теории metallургических процессов (кафедра технологии материалов электронной техники), лаборатория metallургических печей (кафедра пластической обработки металлов) и лаборатория физической химии (кафедра физической химии).

Получена компьютерная техника на 300 тыс. руб. и денежные средства на стипендии (2500 тыс. руб.)

Достаточно хорошую спонсорскую помощь оказывают выпускники-политехники и факультетам инженерно-строительному, механико-машиностроительному, радиофизическому.

Заключены договоры по научной деятельности между университетом и предприятиями, где руководителями являются выпускники-политехники, на сумму 181 810 тыс. руб. Так, в 2009 году были заключены 8 договоров на сумму 3470 тыс. руб. с ОАО «Электросила» (концерн «Силовые машины»), 9 договоров на сумму 1573 тыс. руб. с Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе, 1 договор на сумму 1520 тыс. руб. с ООО «Скат», 10 договоров на сумму 3470 тыс. руб. с ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 4 договора на сумму 9474 тыс. руб. с Центром лазерной технологии, а в 2010 году — с РКК «Энергия» на сумму 100 млн руб.

Закуплено для университета оборудование и введена в эксплуатацию мультимедийная лаборатория в гидрокорпусе ауд. 311, (830 тыс. руб.). Выпускниками ММФ построен фонтан у I-го корпуса (5,5 млн руб.) и памятник студенту-политехнику (1,5 млн руб.)

Члены ПС участвовали в финансировании проведения «Вечеров в Политехническом» (М.Э. Осеевский, С.А. Шидловский, А.В. Гордин, В.В. Гиршова) и приобретении для Белого зала рояля (В.А. Лопота, С.Б. Королев, В.П. Скатин).

Издано и передано университету 240 экземпляров книги «СПбГПУ — биографии: Энциклопедия» на сумму 480 тыс. руб.

Оказывалась материальная помощь и производилось поощрение сотрудников университета, санаторий-профилакторий ежегодно обеспечивался лекарственными препаратами

для лечения студентов и сотрудников СПбГПУ (720 тыс. руб.).

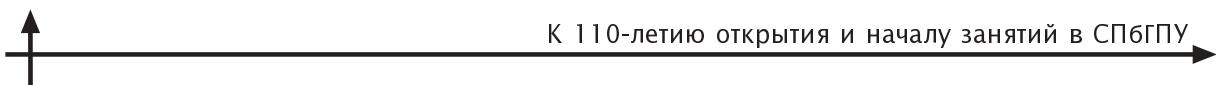
Были организованы съемки в университете различными кинокомпаниями телевизионных, художественных и документальных фильмов, повышающих имидж университета. Так, в 2007 году создан документальный фильм «Физики и лирики» о выдающихся выпускниках-политехниках (450 тыс. руб.)

Изданы книги культурно-исторического направления с частичной или полной оплатой (320 тыс. руб.) Так, на средства ПС была выпущена книга «Политехники в странах Африки» (93 тыс. руб.) и другие книги. Оказано содействие в выпуске книг «110 лет на службе России» (к 110-летию основания СПбГПУ) и «Ленинградские политехники в Великой Отечественной войне», посвященной 65-летию Победы, для Фундаментальной библиотеки приобретены книги — энциклопедия «Великая Россия» (110 тыс. руб.).

В честь 65-летия Победы проведена торжественная встреча с работающими в университете участниками Великой Отечественной войны (14 человек). Участникам войны были подарены жидкокристаллические телевизоры TOSHIBA стоимостью 10 тыс. руб. каждый, а Совету ветеранов ВОВ, военной службы и жителей блокадного Ленинграда — компьютер стоимостью 30 тыс. руб.

Большое значение уделялось взаимодействию с организациями, объединяющими выпускников-политехников.

В 2005 году оказано содействие в создании Ассоциации политехнических предприятий «Полибизнес», объединяющих более 40 предприятий, где руководителями являются выпускники-политехники, а в 2009 году — Благотворительного фонда «Политех», основной задачей которого стало внедрение разработок сотрудников и студентов СПбГПУ в промышленность. Совместная работа с организациями, объединяющими выпускников-политехников (Клуб выпускников СПбГПУ, Ассоциация «Полибизнес», Благотворительный фонд «Политех», клубы выпускников ММФ и ЭлМФ), координация их действий, а также совместный выпуск журнала «Полибизнес» и газеты «Эхо Политеха» позволили эффективно использовать потенциал этих организаций для развития СПбГПУ.



Попечительский совет успешно решает отдельные вопросы деятельности университета. Так, члены ПС не только в лице представителей СПбГПУ, но и руководителей организаций проводят занятия со студентами (М.В. Сильников, С.Н. Жданов, М.Э. Осеевский, А.М. Соловейчик).

ПС принял меры по предотвращению строительства торгового комплекса у станции метро «Политехническая».

Всем членам ПС и сотрудникам возглавляемых ими предприятий университетом представляется услуги, определенные коллективным договором, что позволило расширить взаимовыгодные связи университета с предприятиями. Увеличилось количество посещающих оздоровительную базу «Политехник» (п. Новомихайловский Туапсинского р-на Краснодарского края), ДОЛ «Политехник» (пос. Ушково Курортного р-на СПб), спортивный комплекс, концерты в Белом зале, типографию, подготовительные курсы и курсы изучения иностранных языков, столовые и кафе. Некоторые сотрудники предприятий получают в СПбГПУ второе высшее образование, выбирают получение здесь первого высшего образования для своих детей и родственников. Так от ЗАО «Транссфера» в 2009 году в университет поступило 3 человека.

Члены ПС активно участвуют в заседаниях Ученого совета и в различных научных, технических и других конференциях, а также в праздничных мероприятиях. Так, в праздновании 110-летия СПбГПУ и II-м Международном деловом форуме «Инновации: наука, образование, бизнес» приняли участие соответственно 29 и 14 членов ПС.

Попечительский совет представлял интересы СПбГПУ на 80 различных мероприятиях как в России, так и за рубежом.

Был проведен анализ тем диссертаций аспирантов с докладом результатов работы ректору.

Ученому совету университета Попечительским советом были представлены лица, внесшие большой вклад в развитие СПбГПУ, для присвоения им почетных званий. Так, были присвоены звания: И. И. Клебанову (полномочному представителю президента РФ по Северо-Западному Федеральному округу) — «Почетный профессор», митрополиту Кириллу (в настоящее время Патриарху Московскому и всея Руси) — «Почетный доктор наук».

Организовывались встречи членов ПС — руководителей предприятий со студентами выпускных курсов с целью дальнейшего их трудоустройства. Так, генеральный директор ОАО «Компрессор» по два раза в год встречается со студентами ЭнМФ и ММФ.

В Главном здании создана галерея фотопортретов видных ученых.

Активно работают в Попечительском совете: Г.А. Исакеев — управляющий филиалом «НОВИКОМБАНК»; С.А. Скорик — генеральный директор Управляющей компании «Транссфера»; М.В. Сильников — генеральный директор ЗАО «НПО специальных материалов»; К.А. Соловейчик — заместитель председателя Комитета по экономическому развитию Санкт-Петербурга; С.А. Шидловский — президент Группы компаний «Транссфера».

На состоявшемся 10.12.2009 отчетно-выборном собрании были избраны руководящие органы Попечительского совета: председатель — Юрий Сергеевич Васильев, президент СПбГПУ, академик РАН; заместитель председателя — Алексей Иванович Федотов, советник ректора, президент Санкт-Петербургской инженерной академии; секретарь — Вячеслав Иванович Скуратов, помощник президента.

Правление: Юрий Сергеевич Васильев — председатель правления; Алексей Иванович Федотов; Виталий Николаевич Боронин, советник ректора, профессор; Михаил Владимирович Сильников, генеральный директор НПО специальных материалов; Геннадий Анатольевич Исакеев, управляющий филиалом «НОВИКОМБАНК».

Рабочая группа: Юрий Сергеевич Васильев; Алексей Иванович Федотов; Вячеслав Иванович Скуратов.

Контрольно-ревизионная комиссия: Александр Иванович Алхименко, декан ИСФ; Вячеслав Иванович Скуратов, помощник президента СПбГПУ; Елена Ивановна Козлова, ведущий документовед АПУ (бухгалтер).

На состоявшемся 27.01.2011 в Доме ученых заседании Попечительского совета ректором университета членом-корреспондентом РАН М.П. Федоровым за большой личный вклад в развитие СПбГПУ пяти членам совета была объявлена благодарность, а 15 членов были награждены грамотами.

В.Ф. Розин, С.А. Прохоров, А.В. Каженцев

ДОМУ УЧЕНЫХ В ЛЕСНОМ — 75!

Осенью 2009 года Дом ученых при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбГПУ) отметил свой юбилей — 75 лет.

Скромное двухэтажное здание в тенистых аллеях юго-восточной части парка для нескольких поколений ученых нашего города стало вторым домом, местом проведения научных дискуссий, интересных встреч. Многие, в том числе и сотрудники, работающие в нем, любовно называли и называют его Домом ученых в Лесном.

В начале 30-х годов прошлого столетия на Выборгской стороне в районе Лесное — Гражданка усилилось формирование научно-технического и учебного потенциала Ленинграда: Политехнический, Физико-технический институты, Лесотехническая академия и другие вузы и научные учреждения микрорайона стали новым местом сосредоточения научных и учебных кадров города. Ввиду территориальной отдаленности от культурного центра города возникла острая потребность в создании здесь нового очага культуры. Для решения этого вопроса по инициативе ученых Политехнического института на базе Центрального клуба научных работников на Мойке был создан его филиал в Лесном, ставший прообразом Дома ученых.

Работу филиала возглавило временное управление в составе профессоров А.М. Залесского, К.К. Попова, В.В. Шульца. Были созданы первые секции: научно-общественная, библиотечная, художественная, физкультуры и спорта, по работе с детьми. Тогда же были созданы кружки: театральный и вокальный для взрослых, музыки и рукоделия — для детей.

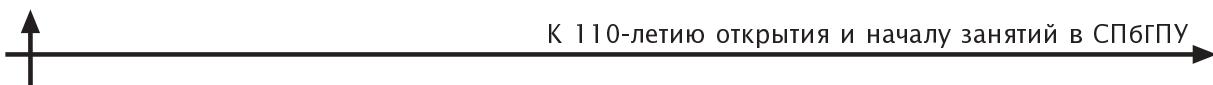
Поначалу всю работу ученым приходилось проводить в стесненных условиях, в скромной обстановке. Специального помещения не было. Библиотека, например, располагалась в двух шкафах читального зала Фундаментальной библиотеки ЛПИ. Лекции, доклады и занятия кружков проводились в свободных на какое-то время помещениях института, что не способствовало нормальной и планомерной научно-общественной деятельности ученых, организации культурно-массовых мероприятий и отдыха.

В октябре 1934 года приказом по Главному управлению учебными заведениями Наркомтяжпрома был учрежден Клуб ученых в Лесном при Ленинградском индустриальном институте (название Политеха в то время) для «проведения политico-воспитательной работы и культурно-бытового обслуживания ученых, научных работников и членов их семей». Для этой цели институт выделил Клубу здание в южной части лесопарка — двухэтажный каменный дом (до этого в здании размещалась неполная средняя школа, а еще раньше, когда здание было одноэтажным, — поликлиника). Так началась история Дома ученых в Лесном...

Школьные классы были переоборудованы в гостиные, помещения для библиотеки, бильярдной, для лекционной и кружковой работы, зрелищных мероприятий. Появился ресторан, где для членов Клуба устраивались домашние обеды. Ресторан считался элитным в системе общепита и был предназначен только для ученых. Пропускной режим контролировал швейцар.

Интерьеры Клуба ученых также претерпели значительные изменения: появились хрустальные люстры и зеркала, мебельные гарнитуры и книжные шкафы из красного дерева, мраморные статуэтки, изделия из бронзы и произведения живописи. Многие вещи, как и книги для библиотеки, ученые-меценаты подарили своему Клубу. Другим источником пополнения убранства гостиных и залов Клуба были приобретения, сделанные самими сотрудниками.

Благодаря деятельности научной общественности Клуб ученых зажил активной творческой жизнью. Создавались научные секции, к работе которых привлекались профессора Политехнического, организовывались художественно-зрелищные мероприятия — концерты и спектакли, проводимые профессиональными артистами и членами коллективов самодеятельности. Вокальный и драматический кружки выступали на сцене не только Клуба ученых, но и в Лесотехнической академии, Военной академии связи, Доме учителя и на других площадках города. Для участия в концертах приглашались лучшие артистические силы города и страны.



Состоялись встречи ученых с народными артистами СССР Сергеем Образцовым, Николаем Черкасовым, Василием Качаловым и другими театральными деятелями, видными писателями и учеными.

Накануне войны, в 1940 году, на средства, отпущенные ЛПИ, была оборудована киноустановка, значительно расширявшая возможности клубной работы и ознаменовавшая начало внедрения технических средств информации и пропаганды. Довольно широкий размах приобрела спортивная работа. Так, только в теннисной секции до войны занималось свыше 200 человек. Инструкторами и тренерами по теннису были мастера и заслуженные мастера спорта, неоднократные чемпионы СССР Эдуард Негребецкий, Галина Коровина и другие известные спортсмены. Шахматной секцией в течение ряда лет руководил гроссмейстер, будущий чемпион мира Михаил Ботвинник.

Нормальная, мирная деятельность Клуба ученых была прервана нападением на нашу страну фашистской Германии.

С началом Великой Отечественной войны в жизни Клуба ученых начинается новый период, обусловленный требованиями военного времени. Вся его работа была перенацелена на оказание помощи фронту, а затем — осажденному городу. Агитационно-пропагандистские мероприятия имели целью внести посильный вклад в мобилизацию защитников Ленинграда на отпор врагу. С первых дней войны силами Клуба регулярно проводились лекции и беседы по актуальной в то время тематике: «Зажигательные бомбы и методы их тушения», «Как вести себя по сигналу воздушной тревоги», «Шпионаж и диверсия на службе фашизму» и другие. Лекции сопровождались демонстрацией тематических кинофильмов.

В годы войны Клуб организует культурное обслуживание воинских частей, формировавших народное ополчение, госпиталей. Силами членов Клуба проводились шефские концерты художественной самодеятельности, лекции, до-клады, беседы. Клуб оборудовал в двух госпиталях «красные уголки», организовал библиотечные передвижки, бригады чтецов. Агитбригада в составе профессоров Е.Л. Николаи, И.Л. Повхा, Л.А. Сены, Д.Н. Монастырского, В.Д. Петрова и других провела 252 беседы в палатах для раненых и больных.

Исключительно важное значение имел организованный Клубом ученых в январе 1942 года стационар для истощенных научных работников, студентов и сотрудников ЛПИ. В помещениях Клуба были оборудованы коечные места по типу госпиталя с полным обслуживанием, питанием и врачебной помощью. Через стационар прошло 350 человек, большинство из них после лечения возвращалось в строй.

Вот что по этому поводу пишет в газете «Политехник» № 17 от 1994 года в своих воспоминаниях доцент кафедры радиофизики Н.М. Золотухина: «Совсем ослабевшую маму я отвела 31 марта 1942 года в стационар, организованный в нашем Клубе ученых. Там было тепло, уютно и хорошо кормили. Там спасли ей жизнь...»

В сентябре 1946 года постановлением Президиума ЦК профсоюза работников высшей школы и научных учреждений Клуб ученых был преобразован в Ленинградский Дом ученых в Лесном. В это время возобновляются довоенные направления деятельности, появляются новые. Пополняются ряды членов Дома ученых за счет научных работников ФТИ, ЦКТИ, ВНИИГ, Института постоянного тока, Хирургического, Туберкулезного институтов, ЛТА, Академии связи и Военно-электротехнической, Главной геофизической обсерватории и других научных учреждений микрорайона.

Всего в те годы в ДУ насчитывалось более 600 членов, в их числе: 3 академика, 67 профессоров, 162 доцента и кандидата технических наук, 63 ассистента, 102 аспиранта, 145 младших научных сотрудников. Среди них — 13 лауреатов Сталинской премии.

В 50—60-е годы Дом ученых направлял свои усилия на пропаганду и реализацию задач послевоенных пятилеток, на повышение идеиного уровня членов ДУ, на их культурно-бытовое обслуживание, оказание научно-технической помощи промышленным предприятиям Выборгской стороны.

Пик активности в деятельности Дома ученых приходится на 70-е — 80-е годы XX века, когда все настойчивее ставилась задача перестройки клубной работы. В эти годы ДУ переживал период расцвета. Полторы тысячи членов ДУ, Народный университет с семью факультетами, более 20 научных секций, 9 лекториев и циклов лекций, 8 абонементов тематических вечеров и «круглых столов», три цикла концертов и лекций-концертов, молодежный дискуссионный

клуб, пять клубов по интересам, более 20 любительских объединений, студий, кружков и прочих коллективов для взрослых, 7 абонементов и 12 различных кружков для детей.

Выдающиеся ученые страны, видные деятели науки и техники, среди которых было очень много политехников, участвовали в жизни научных секций ДУ, выступали с лекциями во время конгрессов и форумов, конференций и симпозиумов. Ученые-политехники делились опытом и рассказывали о своих впечатлениях, побывав за рубежом, принимали участие в концертах известные артисты театра и кино. В те времена мастера искусств с большой охотой шли на общение и показывали свои новые работы научной интеллигенции страны. Аркадий Райкин, Владимир Высоцкий, Юрий Бизбор, Ефим Копелян, Кирилл Лавров, Игорь Горбачев, Евгений Лебедев и многие, многие другие выступали на сцене Дома ученых в Лесном.

Дом ученых был одной из площадок первого Международного фестиваля документального кино «Послание к человеку» под председательством Дэвида Аттенборо. Здесь выступали звезды Ленинградского рок-клуба Сергей Курехин, Борис Гребенщиков, Майк Науменко. Зал Дома ученых, а затем и Белый зал Политеха полюбили известные исполнители авторской песни Александр Розенбаум, Вероника Долина, Евгений Клячкин, Алексей Суханов и многие другие. Выставки художников и фотографов в фойе Дома сменяли одна другую...

В тот период в штате Дома ученых насчитывалось до 37 сотрудников и до 50 педагогов. Все-ми формами работы постоянно действующих объединений и кружков было охвачено более 700 взрослых и около 1200 детей. Согласно оценкам вышестоящих органов Ленинградский Дом ученых в Лесном занимал одну из верхних строчек в списке родственных культур учреждений, его ставили в пример другим Домам ученых страны. Основными направлениями его деятельности в то время были общественно-политическое, научное, культурно-просветительское, спортивно-массовое, а также внешкольная работа среди детей и подростков.

Работе с детьми в Доме ученых всегда уделялось большое внимание, ведь под одной крышей с ним находится детский сад № 41, открытый еще в 1932 году, за два года до официального учреждения Клуба ученых. Его создание связано

с именем К.Ф. Рожанской, супруги известного ученого-физика члена-корреспондента АН СССР Д.А. Рожанского. Выпускница Высших Фребелевских курсов, многолетний председатель Совета жен ученых Политехнического института, она много сил отдавала организации дошкольного воспитания и окружала материнской заботой питомцев детского садика.

Именно хорошо организованная и отлаженная работа с детьми и подростками в кружках иностранных языков позволила Дому ученых в нелегкое перестроенное время выдержать напор рыночной стихии и устоять на ногах. Удалось сохранить уют и тепло залов и гостиных, библиотечный фонд, который на сегодняшний день составляет около 36000 экземпляров, те немногие коллектизы, которыми ДУ всегда гордился: студию вышивки «Русские узоры» народного мастера России Л.И. Хоповой, студию вокала «Лесные голоса» (рук. — заслуженная артистка Российской Федерации Т.В. Богданова), литературное объединение, которое многие годы возглавлял известный поэт А.С. Кушнер...

За годы своего существования Дому ученых пришлось пережить череду переподчинений. Его руководящими инстанциями в разное время были Центральный клуб научных работников, ЛПИ, Обком профсоюза. И вот летом 1991 года приказом ректора СПбГТУ Ю.С. Васильева Дом ученых был включен в структуру Политеха. Ведь он связан с университетом самыми тесными узами и является его детищем. Все эти годы работу Дома ученых определял и направлял Совет Дома ученых, в который входили руководители университета, известные ученые и профессора: К.П. Селезнев, Ю.И. Уханов, М.В. Костенко и ныне здравствующие Ж.И. Алферов, М.П. Федоров и многие, многие другие.

На сегодняшний день Дом ученых является местом проведения различных научных конференций и форумов, прежде всего Политехнического университета. Из других научных учреждений сюда приходят по старой памяти. Кому-то нравится небольшой, но уютный зал на 130 мест, кому-то — возможность общаться и вести научные споры в гостиных в окружении скульптур из мрамора и бронзы. Кого-то устраивает, что в Доме ученых находится кафе с тремя залами, что очень удобно и экономит времени.

По сравнению с прошлыми годами ученые стали бывать здесь реже: закрылись научные сек-



ции, сократилось количество клубов и объединений по интересам, но этому есть объяснение. За последние 15 лет появились новые технические возможности общаться с любой точкой земного шара, вести видеоконференции, обмениваться опытом и информацией с помощью интернета и других средств связи. Но, поскольку ничто не заменит человеческого общения, двери Дома ученых всегда открыты для тех, кому он предназначался изначально, — для ученых.

Отрадно отметить, что Дом ученых стал известен среди младшего поколения политехников. Профком студентов систематически организует такие известные мероприятия, как встречи команд КВН, факультетские вечера, студенческие конкурсы. Регулярно проходят заседания студенческого научного общества, отдела по работе с молодыми учеными СПбГПУ. В последние годы получил широкую известность проводимый на базе Дома ученых политехнический симпозиум «Молодые ученые Северо-Запада — промышленности Санкт-Петербурга».

Не забывают Дом ученых и ветераны университета, ветераны войны и военной службы. Кроме ежегодных отчетно-выборных собраний, по их инициативе проводятся встречи жителей района

с депутатами Законодательного собрания Санкт-Петербурга, местных законодательных органов, представителями районных администраций и муниципальных образований. Много лет функционируют хор ветеранов-политехников и группа здоровья. Кроме того, ветераны являются наиболее активными читателями библиотеки ДУ.

С введением в строй Центра культурных программ СПбГПУ в Доме ученых заметно снизилось количество культурно-массовых мероприятий. В то же время, здесь регулярно проводят вокальные и хореографические фестивали Домов детства и юношества Калининского, Выборгского и Приморского районов города.

Стали традиционными и такие мероприятия, как вручение аттестатов выпускникам Естественно-научного лицея, посвящение в студенты, вручение дипломов об окончании университета.

Сегодня по-прежнему здесь много детей, и это вселяет надежду. Как знать, сколько их, обучающихся в Доме ученых в Лесном, который хранит многолетние традиции, и прогуливающихся по парку университета с более чем вековой историей, станут выдающимися учеными, специалистами или просто студентами и пронесут гордое имя — ПОЛИТЕХ.

И.А. Соловьев, В.А. Соколов

К ИСТОРИИ СТУДЕНЧЕСКОГО КЛУБА СПБГПУ

Широта духовных запросов будущих инженеров, тяга «технарей» к культуре и искусству, к знаниям, не входящим в программы обучения, прежде всего — к гуманитарным дисциплинам, можно сказать, существовала изначально. Если прибавить к этому потребность в неформальном общении по интересам, то возникновение студенческих кружков с самого начала жизни Политехнического института было явлением естественным.

В дореволюционные годы среди кружков заметно выделялся музыкальный. Студенты и преподаватели с удовольствием музиковали для своих коллег, и такие вечера были очень популярны. «Развитие и удовлетворение эстетических потребностей необходимо и неизбежно даже

наряду с ответственными научными занятиями, ибо лучший отдых — перемена работы», — пишет в первом номере газеты «Политехник» 1912 года участник такого кружка, отмечая, что подобные кружки возникали в учебных заведениях уже в 1902—1903 годах. Известно о существовании Хоровой капеллы Санкт-Петербургского Политехнического института, занимались студенты изобразительным искусством, играли любительские спектакли.

Дата возникновения на базе разных кружков собственно Студенческого клуба неизвестна. С приходом в начале 20-х годов в институт представителей крестьянства и рабочей молодежи наряду с потребностью в образовании наблюдается неистовое стремление студентов «стать

разносторонне культурным человеком», восполнить то, чего им так явно недоставало. Именно культурно-просветительное направление стало в то время самым обширным и определило название вообще всей клубной работы как «культурно-просветработы». Клуб организует многочисленные циклы лекций и кружки по изучению живописи и музыки, архитектуры и театра, литературы и истории. Регулярно проходят встречи с мастерами искусств, концерты профессиональных артистов. И, конечно, работают кружки художественной самодеятельности. Триединство культурно-просветительской, досуговой и художественно-творческой работы составляет сущность деятельности студенческого клуба. А преобладание того или иного направления диктовалось требованиями времени, порой директивными указаниями сверху, идеологическими установками.

Можно отметить всплеск стремления к культуре в первые годы после победы в Великой Отечественной войне — стремление наверстать то, что было отложено на четыре долгих и тяжких года. Период хрущевской оттепели дал новый всплеск жизнеутверждающего, наполненного молодежной романтикой самодеятельного художественного творчества. Горбачевская антиалкогольная кампания диктовала клубу больше внимания обращать на организацию культурного досуга и т. п.

В конце 60-х начался достаточно стабильный период использования клуба в воспитательной работе со студентами. Клуб включен в систему идеологического воздействия, партийное руководство обязывает включать в план работы мероприятия пропагандистского направления с продиктованными сверху разделами. Положительный момент здесь — внимание руководства, стабильное финансирование.

Постепенно, с развитием и доступностью других средств массовой информации, просветительские и пропагандистские формы клубной работы утратили свое значение.

В начале 90-х естественным путем сошли на нет формы работы, связанные с кинематографом. Чисто досуговая, развлекательная функция перешла к специализированным, хорошо оснащенным центрам. Но при всех переменах от момента создания Политехнического института и до настоящего времени неизменным в клубной работе остается художественная самодеятель-

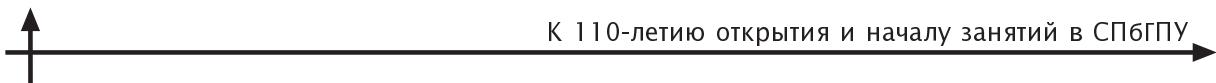
ность, а лучше сказать — любительское художественное творчество студентов. А сам клуб остается местом общения студенчества по интересам. В расчет постоянных посетителей клуба следует брать не только непосредственно занимающихся в творческих коллективах, но и их друзей, и актив организаторов художественных акций.

Именно на базе художественного творчества политехников возникали интереснейшие традиции и отмечались большие достижения. Несомненен и достаточно велик вклад студентов-политехников в культуру Ленинграда — Санкт-Петербурга, России.

Начнем с музыкальных кружков и музыкальных традиций. Как уже сказано выше, музыкальные кружки появились с первых лет после начала деятельности Политехнического института. В 30-е годы в студенческом клубе работали самодеятельные духовой оркестр, струнный оркестр, джаз-оркестр. Был широко известен в городе и стране симфонический оркестр под руководством В.Э. Фехнера. Вместе с симфоническим оркестром на концертах и смотрах выступал академический хор и солисты-вокалисты. Такой концерт с более чем часовой программой 15 апреля 1937 года транслировался по Всесоюзному радио. Лишь в конце пятидесятых симфонический оркестр политехников не мог уже выступать самостоятельно, а участвовал в концертах в составе сводного студенческого оркестра вместе с ЛГУ. Не хватало музыкальных инструментов, средств на приглашение педагогов-инструменталистов.

Джазовые и эстрадные оркестры просуществовали до начала 70-х годов. В разные годы ими руководили такие известные музыканты как С. Хмельницкий, А. Сквицкий, К. Ягдман, И. Блехман, Ю. Скоморовский, Ф. Соломоник, Е. Болотинский. Помимо выступлений с концертами, они обеспечивали музыкой и студенческие танцевальные вечера.

Периодически организовывались, разваливались и восстанавливались духовые оркестры и оркестры народных инструментов, то же можно сказать и о струнном квартете при симфоническом оркестре. Такая нестабильность связана с естественной сменой поколений студентов. Более десяти лет был известен в городе ансамбль скрипачей из Политехнического, созданный



в 1980 году М.Н. Яцко. С уходом немолодого уже руководителя найти ему достойную замену не удалось. Да и набрать даже небольшой состав скрипачей из студентов становилось все трудней. Пример из более позднего времени: композитор Ю.В. Карусев, много лет подряд руководя студией музыкальных ансамблей, пытался собрать эстрадный оркестр. Набрать хотя бы минимальный состав инструменталистов так и не получилось. Дело ограничилось маленьким ансамблем, очень недолго просуществовавшим.

Направление музыкальных пристрастий студенчества менялось — новые времена, новые моды. С 70-х годов становится популярным жанр вокально-инструментальных ансамблей (ВИА). Среди студенческих ансамблей политехнического были широко известны такие как «Лель», «Возрождение», «Лесной проспект», «Орион», «Бриг», «Сезон дождей» и др. В 70-е—80-е годы проводятся регулярные фестивали «Весенние ритмы», в которых участвуют по 5—7 ВИА института. Эта традиция сохранялась до недавнего времени. Названия фестивалей, правда, менялись. Несколько лет подряд руководитель студии музыкальных ансамблей И.И. Батариили организовывал фестиваль «В Лопухах». Клуб ЛПИ студенты в шутку называли клуб «ЛоПухИ», может быть, еще и потому, что во дворе за клубом действительно росли лопухи. Среди участников фестиваля были известны такие группы, как «Эсперанто», «Графики», «ПравилотрехД», «Театр теней» и др. В конце 90-х в клубе начал проводиться фестиваль «Полирок». Но через несколько лет инициативная группа студентов с благословения студенческого профкома взяла инициативу проведения фестиваля в свои руки и увела его из клуба под предлогом того, что клубный арсенал акустической аппаратуры и музыкальных инструментов морально и физически устарел. «Полирок» очень быстро превратился в коммерческий проект, в котором места рок-группам студентов-политехников отводилось все меньше, затем и вообще перестал существовать. До недавнего времени студенческие рок-группы выступали на клубной сцене все с той же старой аппаратурой. В середине 90-х по инициативе студенческого профкома в клубе базировалось творческое объединение «Полигон». Он организовывал концерты популярных групп, а наши студенческие рок-ансамбли не-

редко участвовали в этих концертах «на разогреве». «Полигон» обеспечивал своей акустической и светоаппаратурой многие студенческие мероприятия и концерты самодеятельности. Это был хоть какой-то выход из тупика клубной нищеты. Тем более, что молодежный рок-клуб «Полигон» имел большую популярность среди любителей этого жанра.

Давние традиции имеет и хоровое искусство студентов-политехников. Мы уже упоминали о хоровой капелле, имевшей известность в начале прошлого века. В советское время был широко известен хор Ленинградского индустриального института под руководством хормейстера Театра оперы и балета им. С.М. Кирова Ураевского, официально занесенный в список 14-ти лучших любительских хоров города. Выступления этого коллектива неоднократно звучали по Всесоюзному радио.

После ВОВ в институте уже в 1946 году выступал возрожденный хор под руководством Пирожкова, в нем пели 80 человек.

Тринадцать лет просуществовал академический хор под руководством Льва Борисовича Раковицкого, пришедшего в ЛПИ еще студентом консерватории. Академический хор политехников (начал работу в 1951 г.) вскоре стал лауреатом городских и всесоюзных смотров, выступал в Академической капелле, Большом зале филармонии, выезжал с концертами в Москву, Ригу, Таллинн, другие города. Записи его выступлений хранятся в Золотом фонде Всесоюзного радио. Уже в 1955 году хор политехников признан вторым лучшим вузовским хором, наряду с хором ЛГУ. В нем было два состава: хор студентов и хор инженеров (выпускники). Сводный состав доходил до 160 человек. Положительный отзыв о нем дал такой авторитетный специалист, как профессор А.В. Свешников. К 1964 году хор имел в своем репертуаре 240 произведений и 300 концертов на счету. Не стало мастера, и в 1965 году хор начал распадаться. Некоторое время его пытались поддержать Ф. Соломоник, В.Н. Мызников. Впрочем коллектив сохранил свою дружбу и любовь к хоровому искусству. Через 33 года более 50 участников хора вернулись в родной вуз, чтобы выступить на торжествах, посвященных 100-летию Политехнического. И сегодня оставшаяся часть этого хора поет в клубных концертах, являясь примером верности творческим и человеческим традициям СПбГПУ.

В 1968 году в достаточно короткий срок удалось создать новый академический хор. Он начинался как хор факультетский. Большой энтузиаст, замдекана электромеханического факультета Сергей Леонидович Чечурин организовал чуть ли не поголовное прослушивание всех поющих на своем факультете. И несколько лет продолжал поддерживать организованный набор в коллектив, даже когда хор стал общевузовским. Руководителем тогда был приглашен Заслуженный работник культуры В.Г. Чернин, хормейстером с ним работала Т.Г. Томашевская. Уже в 1971 году хор выступал в Дрездене и Берлине, достойно представляя институт, в 1975 гастролировал в Чехословакии, в 1976 — в Польше. В 1977 году хор снова выступал в Дрездене на 150-летии Политехнического института. В этом же году Академическому хору Ленинградского политехнического института было присвоено почетное звание «Народный коллектив». Хор пел в своих стенах, в Академической капелле, филармонии, на других престижных площадках, записывался на радио и телевидении, выезжал в другие города. В начале 80-х с В.Г. Черниным работает хормейстер В. Мелкой, который через несколько лет стал художественным руководителем коллектива. В конце 80-х в хор на некоторое время возвратились Чернин и Томашевская и подготовили с коллективом программу, посвященную юбилею института (1992). Многим памятны проводившиеся тогда выступления хора на мраморной лестнице Главного здания. Покинув хор по причине большой занятости, Чернин (тогда — главный режиссер БКЗ) и Томашевская (заведующая кафедрой хорового дирижирования в Институте культуры) рекомендовали способную преемницу, но она не смогла сохранить великолепный коллектив, представлявший хоровое искусство политехников более 22 лет.

С 1998 года с приходом в клуб И.А. Соловьева начинается новый этап возрождения хоровых традиций Политехнического.

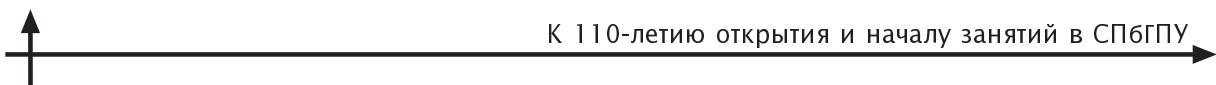
Театральные традиции ведут свое начало от любительских спектаклей начала прошлого века. В 20–30 годы драмкружки работали и в клубе, и на факультетах. В 1936 году директор Индустриального института П.А. Тюркин даже планировал создать при институте профессиональный студенческий театр. Что под этим словосочетанием имелось в виду, судить сегодня трудно — идея так и не была воплощена в жизнь.

В 1937 году на смотре художественной самодеятельности вузов Ленинграда ни одним учебным заведением не был представлен театральный жанр. Но уже с 1938 года драматический коллектив института ставил такие серьезные произведения, как «Тартюф» Ж.-Б. Мольера, «Таланты и поклонники» А.Н. Островского, «На дне» М. Горького (режиссер В. Гуров).

С 1950 года студенческим театром Политехнического института стала руководить Людмила Владимировна Гейдрих. В коллективе в то время занимались до 60 человек. Поставлены и успешно показывались такие спектакли, как «Юность отцов» Б. Горбатова, «Затех, кто в море» Б. Лавренева, «Директор» А. Алешина, «Таня» А. Арбузова, «Три сестры» А. Чехова, «В добryй час» В. Розова, «После разлуки» братьев Тур, «Юстина» Х. Вуолийоки. К 10-летию театра поставлены «Таланты и поклонники» А.Н. Островского, затем «Рождены в Ленинграде» О. Бергольц, «Побег из ночи» братьев Тур, «Мать» К. Чапека. В 1962 году театр со спектаклем «Рождены в Ленинграде» успешно выступал в Москве в Доме народного творчества, в МГУ, МАИ, МВТУ. Этот коллектив просуществовал полтора десятка лет, достойно представляя творчество политехников.

Своеобразным театрально-эстрадным явлением, имевшим большой зрительский успех и неоднозначный официальный резонанс, был спектакль — эстрадное обозрение коллектива малых форм «Липовый сок», состоявшийся весной 1956 года. Талантливые авторы и участники спектакля, веселого и острого пародийно-сатирического представления, В. Синакевич и Е. Заруцкий и принимавший участие в создании текста И. Виноградский впоследствии работали для профессиональной эстрады.

В 1969-м на механико-машиностроительном факультете родился театр. Спектакль по коллективному сценарию «Комсомольцы — беспокойные сердца» открыл историю будущего «Театра-студии на Лесном». С первых дней его режиссером стал Валерий Степанович Суслов — режиссер театра им. В.Ф. Комиссаржевской, а общественным директором — инициатор проекта доцент кафедры ПТМ Л.Г. Серлин, — человек высокоэрудированный не только в своей специальности, но и в искусстве. Уже в 1972 году факультетский театр стал общеинститутским. В 1976 году театр — лауреат ленинградского смот-



ра самодеятельных театров, успешно участвует в третьем туре Всесоюзного смотра. В 1976 году театру-студии ЛПИ присвоено почетное звание «Народный театр». В репертуаре театра были такие произведения как «Ночная повесть» И. Хонинского, «Ночь после выпуска» В. Тендрякова, «Слово о полку Игореве», «Оптимистическая трагедия» В. Вишневского, «Роза и крест» А. Блока, «Усвятские шлемоносцы» Е. Носова, «Четвертый» К. Симонова, «Дракон» Е. Шварца, «Иуда Искариот» Л. Андреева. Театр выезжал на гастроли в другие города, за рубеж. 20 лет работы принесли театру-студии заслуженный успех и популярность, но все-таки театр распался. Стремление сохранить высокий исполнительский уровень привело к завышенным требованиям при конкурсном приеме в труппу. С конца 80-х театр практически не пополнялся — для самодеятельного студенческого театра это оказалось фатально.

Энтузиасты «Театра-студии на Лесном» своими силами сумели оборудовать в клубных помещениях небольшой, но по-театральному оснащенный зал. Когда театр прекратил свое существование в 1991 году, в его помещение переехал другой народный театр — «Глагол».

Этот театр также сначала был факультетским. Он родился в 1971 году на физико-металлургическом факультете. Первые спектакли были главным образом поставлены на собственные тексты и студенческие темы. В процессе становления его называли и театром-клубом, и публицистическим театром, и агитбригадой... Он был и тем, и другим, и третьим. Но прежде всего он был Театром. Свое нынешнее название театр обрел после постановки спектакля «Глагол “инженер”» по повести выпускника-политехника, а ныне известного писателя А. Житинского. Основателем «Глагола», его общественным директором был и остается до сего дня доцент кафедры физической химии Александр Максимович Борщевский. Он же был и режиссером первых постановок. С 1973 года художественным руководителем стал профессиональный режиссер Н. В. Беляк, а с 1976 года — В. Ф. Сивов, ушедший из жизни в 1979 году. Эти два разных художника начали формирование коллектива. А продолжил его Е. Е. Левицкий, проработавший в «Глаголе» с 1978 года до дня своей кончины в 1986 году.

В 1985 году «Глагол» получил почетное звание «Народный театр». В 1999 году А. М. Борщев-

скому присвоено почетное звание Заслуженный работник культуры России. Кажется это уникальный случай — Борщевский не был профессиональным работником культуры, а свою огромную работу осуществлял на общественных началах.

С 1987 года художественным руководителем этого театра стал Константин Валентинович Гershов, оставивший профессиональную сцену ради увлекательной работы с непрофессиональным, но замечательным коллективом. В 2010 году К. В. Гershову присвоено почетное звание Заслуженный работник культуры России.

«Глагол» один из немногих, а может быть, единственный самодеятельный театр, являющийся репертуарным; он играет свои спектакли каждую субботу.

О сороколетней творческой жизни «Глагола» можно писать книги; такая была издана в СПбГПУ с предисловием президента университета академика РАН Ю. С. Васильева: «Народный студенческий театр «Глагол», 1971–1996 гг. История, пресса, статистика». Книга переиздавалась с дополнениями за последующие годы. Кроме всего, театр несколько лет подряд издает посезонный подробный дневник творческой жизни «Глагола». Коротко об этом уникальном театре рассказать невозможно. Театр живет, ежегодно пополняясь студентами нового поколения, но есть в нем и те, кто со студенческой скамьи несколько десятилетий и до сих пор выходит на сцену. Отсылаем за подробностями к вышеуказанным изданиям.

Еще одна традиция, родившаяся в 1968 году в Ленинградском политехническом институте, живет до настоящего времени. Это фестиваль авторской песни «Топос». Сегодня — это старейший в нашем городе фестиваль в данном жанре. Фестивль давно уже вышел за пределы нашего вуза, стал сначала общегородским, затем все больше и все чаще для участия в нем приезжают гости из других городов России, а нередко и из-за рубежа. Уже несколько лет Комитет по молодежной политике Правительства Санкт-Петербурга выделяет грант на проведение этого фестиваля.

В середине 50-х в процессе подготовки к Всемирному фестивалю молодежи и студентов (Москва, 1957) в Политехническом зародилась традиция проведения фестивалей «Студенческая весна». Она существовала до начала 90-х. Имен-



но при подготовке к этому фестивалю, который выливался в большой праздничный конкурс, родились на факультетах многие творческие коллективы, ставшие впоследствии гордостью Политехнического.

До 1992 года Студенческий клуб был профсоюзным. В «лихие девяностые» все перекраивалось, и профком отказался содержать клуб, надеясь создать коммерческий центр досуга. Команда, возглавившая клуб в 1988 году, — директор клуба В.Л. Бесценный и худрук В.А. Со-

ковов — искала способы сохранить клуб, его лучшие традиции.

Решение, которое провел на Ученом совете Ю.С. Васильев, о введении студенческого клуба в структуру Политехнического университета спасло положение. И, несмотря на трудности с финансированием, низкую заработную плату, устаревающее оборудование, клуб выжил в самые тяжелые времена. В.Л. Бесценному в 1998 году присвоено почетное звание Заслуженного работника культуры России.



ПОЛИТЕХНИКИ — ТРИЖДЫ ГЕРОИ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОГО ТРУДА



Н.Л. Духов (1904–1964) — выдающийся ученый-конструктор, крупный специалист в области танкостроения и ядерной техники, член-корреспондент АН СССР (1953), генерал-лейтенант инженерно-технической службы (1954), трижды Герой Социалистического Труда (1945, 1949, 1954), лауреат Ленинской (1960), пяти Сталинских (1943, 1946, 1949, 1951, 1953) премий; кавалер четырех орденов Ленина (1940, 1944, 1949, 1954), Суворова II-ой степени (1945), Трудового Красного Знамени (1944), Красной Звезды (1942) и медалей. Он был главным конструктором танкового производства Кировского завода на Южном Урале — в так называемом «Танкограде» в Челябинске (1943–1948), заместителем главного конструктора — руководителем конструкторского сектора КБ-11 при Лаборатории № 2 АН СССР («Арзамас-16», ныне Саров, — Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики — ВНИИЭФ) (1948–1954), директором, главным конструктором и научным руководителем филиала № 1 КБ-11 (в настоящее время — Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова — ВНИИА) (1954–1964).

В 1928 году Николай Леонидович поступил на машиностроительный факультет ЛПИ и в 1932 году окончил его, уже преобразованный в самостоятельный институт, по специальности «Автомобили и тракторы».



УДК 001:66

Ф.П. Кесаманлы

ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ АН СССР НИКОЛАЙ ЛЕОНИДОВИЧ ДУХОВ

С Николаем Леонидовичем познакомился я еще в 1933 году. Он быстро завоевал репутацию талантливого конструктора и расчетчика. Его вклад в создание танка КВ настолько значителен, что я считаю Духова основным автором этой могучей машины. А накануне войны он сверкнул другими гранями своего таланта, показав себя вдумчивым аналитиком и кропотливым доводчиком. Смысл своей деятельности он видел не в проектах, хотя бы и самых блестящих, а в хорошо налаженном серийном выпуске боевой техники и его скорейшем освоении.

И.М. Зальцман [3, с. 33]

Н.А. Духов родился 13 (26) октября 1904 года в большом украинском селе Веприк Гадячского уезда Полтавской губернии (ныне село Веприк Гадячского района Полтавской области Украины). Он был одним из девяноста двух младенцев, зарегистрированных в 1904 году в метрической книге Успенской церкви села Веприк.

Отец Николая — Леонид Викторович Духов — служил ротным фельдшером, кочевал с места на место и лишь в 1903 году поступил по

найму к богатому земельному магнату Масюку, которому принадлежали обширные плантации сахарной свеклы на Полтавщине, а в самом Веприке — сахарный завод. Леонид Викторович по долгу службы вел прием больных в маленькой амбулатории сахарного завода. Толковый фельдшер быстро превратился в уездного врача. Его знали далеко в округе, за помощью к нему приезжали даже из сел Черниговской и Екатеринославской губерний. После Октябрьской револю-

ции сахарный завод был национализирован, а в селе организовали сельскохозяйственное товарищество, засевшее помещичью землю. Однако кулаки и масюковы наследники, воспользовавшись поддержкой махновцев и петлюровцев, разгромили сельский совет и национализированный завод. Поэтому Леонид Викторович остался без работы и, имея две десятины земли, лошадь и дом, с 1920 года начал заниматься хлебопашеством. Мать Николая — Мария Михайловна Духова, урожденная Осипова, дворянка по происхождению, была дочерью обедневшего помещика полтавского села Кибницы Михаила Никифоровича Осипова. В доме ее деда гостила в молодости Н.В. Гоголь. Увиденное в этом селе он впоследствии использовал в своей повести «Как поссорился Иван Иванович с Иваном Никифоровичем».

Учился Николай сначала в начальной школе села Веприк, а затем в 1914–1919 годах — в Гадячской классической гимназии. Особенно хорошо в гимназии было поставлено обучение иностранным языкам (Николай Леонидович владел немецким, английским, французским, мог читать техническую литературу на любом из них). В 1919 году гимназию преобразовали в единую трудовую школу второй ступени, а через год Николай получил диплом об ее окончании. О продолжении образования нечего было и думать. Надо было помогать отцу, матери, сестре. Николай стал работать. Сначала, еще школьником, он в 1918–1919 годах был помощником комиссара в Комитете бедноты, в 1921 году — агентом по сбору продналога. В 1922–1924 годах за- ведовал избий читальной, был секретарем земельного отдела сельсовета, в 1924–1925 годах — электромонтером: дежурил на электростанции, делал проводку в домах, подключал свет, ремонтировал линии. В 1924 году вступил в комсомол. В 1925–1926 годах работал на Чумаковском сахарном заводе резчиком свеклы, затем заведующим технико-нормативным бюро.

В 1926 году, когда Николаю было уже 22 года, ему представилась возможность продолжить образование. Комсомольское собрание решило вручить ему единственную путевку на рабфак — рабочий факультет Харьковского геодезического и землеустроительного института.

Надо было набираться знаний — ведь он окончил школу шесть лет тому назад. На рабфаке он учился успешно, особенно хорошо усваивал знания по математике и физике. Но он не хотел быть ни геодезистом, ни землемером, желал стать инженером. Вскоре после окончания рабфака ему удалось получить документ-направление, напечатанный на бланке со штампом Народного комиссариата РСФСР по просвещению, в котором говорилось:

«6/VII. 1928 г.

Правлению Ленингр. Политехн. ин-та.

Отдел Рабфаков Главпрофобра командирует в счет предоставленных ему мест окончившего Харьковский рабфак т. Духова Н.Л. для зачисления без испытаний на механический факультет.

Зав. Отд. Рабфаков Вахирев

Секретарь Васильев»

Документ этот хранится в личном деле Н.Л. Духова в архиве СПбГПУ [1].

В ЛПИ на первых порах вышла заминка: его документы не вызвали особого доверия. Об этом эпизоде в жизни Николая Леонидовича хорошо написано в повести В. Вишнякова [2, с. 165]: «Кое-что прояснилось, когда Николая неожиданно вызвали на беседу к товарищу в полу涓ной форме, занимавшему в институте несовсем ясное, но, несомненно, важное положение. Беседа с этим спокойным, даже несколько флегматичным человеком навсегда запомнилась молодому студенту.

— Духов — это ваша настоящая фамилия? — негромко спросил он.

— То есть... в каком смысле? — растерялся Николай. — Я не совсем понимаю...

— В анкете вы указали, что ваш отец занимается хлебопашеством. Имеет две десятины



Н.Л. Духов — рабфаковец



земли, дом и одну лошадь. — Товарищ сделал впечатительную паузу. — Словом, крестьянин-бедняк. Но, по имеющимся сведениям, Духов Леонид Викторович — в прошлом военный фельдшер, служил на сахарном заводе земельного магната Масюка, заведовал амбулаторией.

— До революции — да, работал на сахарном заводе фельдшером. Но потом завод закрылся, отец остался без работы и с тех пор занимается хлебопашеством.

Товарищ со скучающим видом посмотрел куда-то в окно. Потом снова обратился к лежащей перед ним папке.

— В анкете указано, что в тысяча девятьсот двадцатом году вы окончили единую трудовую школу второй ступени. Где находится эта школа?

— В уездном городе Гадяче.

— Бывшая классическая гимназия.

— Да, но в девятнадцатом году она была преобразована в единую трудовую школу.

Товарищ слегка и, кажется, с удовлетворением кивнул. Потом тем же флегматичным тоном продолжал:

— Значит, вы поступили на рабфак, имея за плечами гимназию?

— Да, но... прошло несколько лет. Я работал на заводе. Многое забылось» [2, с. 165].

После этого разговора все пришло в норму. Николаю выдали лекционную книжку, записали в библиотеку, он получил чертежную доску. Другими словами, стал настоящим студентом. Учился он успешно, пользовался уважением со-курсников. Ему повезло и с учителями. Профессора, читавшие лекции, были украшением советской высшей школы: И.В. Мещерский (теоретическая механика), В.В. Скobelцын (физика), М.А. Шателен (электротехника), А.П. Соколовский (технология машиностроения), Л.В. Клименко (автодело), Д.Н. Дьяков (двигатели внутреннего сгорания). Теоретические курсы подкреплялись обширными хорошо организованными лабораторными и практическими занятиями. Студенты работали в литейном, кузнецном, станкоинструментальном цехах «Красного путиловца», ремонтировали машины на заводе «Промет», ездили даже в Москву на завод «АМО» (ныне завод имени Лихачева). На четвертом курсе уже пробовали свои силы как конструкторы в проектной организации Ленгидроавто [3, с. 106, 107].



Н.Л. Духов — студент.

1930 год

После окончания Ленинградского машиностроительного (бывшего и будущего политехнического) института Н.Л. Духов был направлен на завод «Красный путиловец», где он стал заниматься практической конструкторской деятельностью

В первые пять лет работы на заводе ему пришлось решать разнообразные задачи. Начал он с участия в конструирования первых легковых автомашин «Ленинград-1», которые, сверкая на солнце черными лакированными кузовами и хромированными деталями, возглавляли колонны краснопутиловцев на первомайской демонстрации 1933 года. Потом он проектировал приспособления для вытачивания деталей пропашного трактора «Универсал», ставший первым советским трактором, экспортным за границу: в Голландию, Ирак и Турцию.

В 1935 году железнодорожному транспорту страны срочно понадобились мощные 75-тонные подъемные краны. Правительство СССР решило заказать такие краны германской фирме «Демаг», единственной в мире изготавливающей подъемные механизмы большой мощности. Выполнить такой заказ за полгода фирма категорически отказалась. Тогда нарком тяжелой промышленности Серго Орджоникидзе попросил изготовить такой кран на заводе, уже носившем к этому времени имя С.М. Кирова. Получив задание наркома, заводчане обратились в «Гипростальмост» с просьбой срочно изготовить чертежи по разобранному образцу, находящемуся

в Москве. Оттуда ответили, что на это потребуется семь с половиной месяцев. В результате для изготовления чертежей завод вынужден был послать в Москву группу своих конструкторов в составе Н.Л. Духова, А.Ф Архангельского и Г.С. Никифорова. Они сделали чертежи за 23 дня. Это позволило Кировскому заводу своевременно выполнить правительственные задания.

По окончании производства кранов Николай Леонидович был переведен в конструкторскую группу по разработке чертежей нового легкового автомобиля Л-2. В 1937 году Духова перевели в СКБ-2 и назначили руководителем расчетной группы. Там под его личным руководством были систематизированы имеющиеся материалы и разработаны методики и нормы тягового и прочностного расчетов танков, принятые как типовые для последующих проектов танков Кировского завода. Затем он был назначен начальником КБ Т-28, бывшего тогда основным объектом танкового производства Кировского завода. Для Т-28, кроме ряда мелких усовершенствований по ходовой части и вооружению, под его руководством была разработана новая бортовая передача, которая окончательно разрешила вопрос аварийного ответственного узла танка Т-28.

В 1937–1939 годах при разработке в СКБ-2 новых типов танков Духовым был разработан технический проект тяжелого танка КВ («Клим Ворошилов»), а после защиты проекта под его же руководством были изготовлены рабочие чертежи и опытный образец танка КВ, успешно про-

шедший испытания и принятый для серийного производства. В 1939 году при освоении в серийном производстве танка КВ Н.Л. Духова назначили заместителем главного конструктора танкового производства.

За разработку и подготовку на серийное производство танка КВ Духов был награжден орденом Ленина. Вручал орден 14 апреля 1940 года в Таврическом дворце «всесоюзный староста» М.И. Калинин.

В 1939–1940 годах, во время советско-финской войны, за разработку минных тралов, защитных и ряда других приспособлений для нужд фронта Николай Леонидович награжден медалью «За трудовую доблесть».

В начале Великой Отечественной войны Кировский завод был эвакуирован на Южный Урал — в город Челябинск, где слился в единый коллектив с Челябинским тракторным заводом — «Танкоград». Сам Н.Л. Духов в справке о своей технической деятельности в Челябинске в 1941–1944 годах пишет так:

«В 1941 году, в начале войны, был командирован на ЧТЗ, где мною был предложен ряд принципиальных конструктивных решений, давших большой производственный эффект. Эти решения впоследствии были приняты на всех последующих модификациях и новых образцах танков конструкции Кировского завода.

Сюда относятся разработка новых упрощенных соединений броневых деталей тяжелых танков без снижения качества бронезащиты, внедрение броневого литья, включая башни тяжелых танков, исключительно простые и надежные в эксплуатации катки ходовой части для тяжелых танков, принятые как стандартные на танках конструкции Кировского завода. Кроме того, была проведена большая работа по снижению трудоемкости машины, сыгравшая существенную роль в повышении выпуска тяжелых танков.

В процессе производства в обеспечение бесперебойного выпуска танков давались сотни мелких конструкторских решений.

Следует указать на одно из них, предотвратившее срыв выпуска танков КВ, — это заменитель подшипника ГПЗ № 244 (Государственный подшипниковый завод — Ред.), применявшегося в ведущем колесе танка КВ, в количестве 4 штук на машину. Мною была разработана оригинальная и исключительно простая в производстве и надежная в эксплуатации взаимозаменя-



Н.Л. Духов —
кавалер ордена Ленина

емая конструкция заменителя подшипника 244, обеспечившая безаварийную работу танка в пределах гарантийного километража.

Пока ГПЗ не наладил после эвакуации производство, Кировский завод в течение четырех месяцев смог обеспечить бесперебойный выпуск танков.

За вышеперечисленные работы в 1942 году я был награжден орденом Красной Звезды.

В 1942 году в соответствии с решением ГОКО была проведена коренная модернизация танка КВ-2, в результате чего был создан КВ-1С, имеющий значительно повышенную динамику против танка КВ и оригинальные, более совершенные узлы — систему охлаждения (новый тип железных водяных и масляных радиаторов высокой теплоотдачи), трансмиссии (новая 8-скоростная коробка передач и планетарный механизм поворота) и ряд других усовершенствований.

За эти работы в 1943 году мне присуждена Сталинская премия.

В 1942 году в июне месяце Кировскому заводу было поручено поставить на серийное производство танк Т-34. Освоение производством танка Т-34 было закончено в течение одного месяца.

За время производства танка Т-34 на Кировском в узлы Т-34 были внесены ряд принципиальных конструктивных улучшений, принятых и на других заводах, производящих танки Т-34.

Главнейшие из них — литые траки из стали 27 СГТ вместо стали Готфильда, штампованные полутраки вместо цельных штампованных, профилированный прокат бандажей опорных катков под сварку, новая конструкция смотровой командирской башенки, проведен ряд конструктивных улучшений 5-скоростной КПП, в результате чего приказом по Наркомату Кировский завод назначен головным по наиболее ответственному силовому узлу танка Т-34.

Разработаны, испытаны и подготовлены для серийного производства: одноблочная масляная система для Т-34, значительно повышающая эксплуатационные качества масляной системы; главный диск с дисками Ферр; клиновый и бесклиновый траки из профилированного проката; оригинальные резиновые самоподвижные манжетные сальники и т. д.

За эти работы в январе 1944 года я награжден орденом Трудового Красного Знамени.

Кроме этого, под моим непосредственным руководством и при участии разработана и поставлены на серийное производство модификации танка КВ-1, КВ-1С, СУ-152, КВ-85, а также последние типы тяжелых танков начиная с момента их проектирования, испытания и постановки на серийное производство» [7, с. 154–156].

За успехи, достигнутые в разработке и серийном производстве тяжелых танков и мощных самоходных артиллерийских установок Указом Президиума Верховного Совета от 5 августа 1944 года Н.Л. Духов был награжден вторым орденом Ленина.

Конструкторскую деятельность в Танкограде Николай Леонидович успешно сочетал с преподавательской работой: с осени 1944 года он начал читать лекции студентам Механико-машиностроительного института (ныне Южно-Уральский государственный университет — ЮУрГУ) и возглавил там кафедру гусеничных машин.

В конце Великой Отечественной войны, 20 апреля 1945 года, Николай Леонидович был награжден орденом Суворова II степени за танки ИС-3, а после победы над Японией 15 сентября того же года ему было присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина (третьего по счету) и золотой звезды «Серп и Молот». В том же году ему было присвоено воинское звание генерала-майора инженерно-технической службы. В результате Н.Л. Духов, не прослуживший ни одного дня в армии, стал генерал-майором и кавалером полководческого ордена. Вот как высоко оценило государство его конструкторскую деятельность по созданию бронетанкового вооружения.

27 июня 1946 года Н.Л. Духову за создание танка ИС-3 была присуждена вторая Сталинская премия.

По окончании войны произошла конверсия Танкограда в Челябинский тракторный завод. Конструкторское бюро Духова занялось срочной работой по проектированию пахотного трактора С-80, нужда в котором в то время была исключительной. С-80 должен был стать первым советским трактором широкого пользования. Его предполагалось оснастить скреперным и бульдозерным навесным оборудованием. На этот трактор шли заказы и от предприятий нефтяной, лесной, угольной промышленности, геологических партий.

В 1947 году Николая Леонидовича назначили главным инженером ЧТЗ, но пробыл он на этой

должности недолго. Летом 1948 года Духов был вызван в Москву, и после этого о нем в течение 16 лет ничего не было известно.

В мае 1964 года в газете «Правда» появился некролог, из которого стало известно, что умер Николай Леонидович Духов — трижды Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и пяти Сталинских премий, генерал-лейтенант инженерно-технической службы, доктор технических наук, член-корреспондент Академии наук СССР. И только в конце 90-х годов прошлого столетия, после рассекречивания и опубликования в открытой печати документов Атомного проекта СССР, стали известны отдельные факты о его жизни в период от лета 1948-го по май 1964 года.

Оказалось, что совершенно секретным Постановлением Совета Министров СССР № 1991 — 775 с/оп от 10 июня 1948 года «Об укреплении КБ-11 руководящими конструкторскими кадрами» за подписью И. Сталина Н.Л. Духов был назначен заместителем главного конструктора — руководителем конструкторского сектора КБ-11 и направлен в Арзамас-16, где занимались проблемами использования атомной энергии. Полный текст Постановления приведен в [5, с.499].



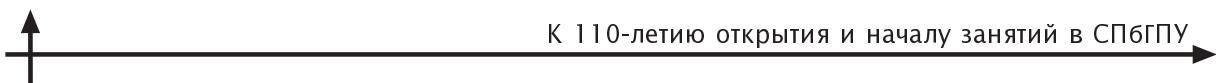
Н.Л. Духов и И.В. Курчатов на даче в Арзамасе-16

Придя в атомную промышленность, Николай Леонидович сумел так организовать коллектив на выполнение чрезвычайно сложных заданий, что по общему мнению, в том числе и И. В. Курчатова, было бы без него трудно выполнить поставленные правительством задачи в определенные им сжатые сроки. Возглавляя конструкторский сектор, он руководил разработками отечественных конструкций как атомных (с плутониевым и урановым зарядами), так и водородных бомб. Он был также активным участником испытаний атомных и водородных бомб на Семипалатинском полигоне. Ю.Б. Харитон вспоминал: «Роль Николая Леонидовича в создании первых образцов оружия была чрезвычайно велика. Вместе со своими товарищами по работе он очень много сделал, чтобы под руководством Игоря Васильевича Курчатова приблизить день ликвидации американской монополии на ядерное оружие».

29 августа 1949 года на Семипалатинском полигоне в Казахстанской степи была испытана первая советская атомная бомба РДС-1 с плутониевым зарядом. Испытания прошли успешно и стимулировали появление 29 августа 1949 года совершенно секретного Постановления Совета Министров № 5070-1944 с/оп «О награждении и премировании за выдающиеся научные открытия и технические достижения по использованию атомной энергии»; Указов Президиума Верховного Совета СССР «О присвоении звания Героя Социалистического Труда научным, инженерно-техническим и руководящим работникам научно-исследовательских, конструкторских организаций и промышленных предприятий» и «О награждении Героев Социалистического Труда Ванникова Б.Л., Музрукова Б.Г. и Духова Н.Л. второй золотой медалью «Серп и Молот». Все это документы с грифом «Не подлежит опубликованию». Полный текст Постановления и Указов есть в [5]. Здесь мы приводим только содержания пункта 62 Постановления, который касается Н.Л. Духова, и текст Указа о его награждении второй золотой медалью:

«Духова Николая Леонидовича, инженера, заместителя главного конструктора, Героя Социалистического Труда:

- Представить к награждению второй золотой медалью «Серп и Молот».
- Премировать суммой 150 000 руб.
- Построить за счет государства и передать ему в собственность дачу.



- Премировать его автомашиной «Победа».
 - Присвоить ему звание лауреата Сталинской премии первой степени.
 - Предоставить ему:
- право на обучение своих детей в любых учебных заведениях СССР за счет государства;
- право (пожизненно для них, их жен и до совершеннолетия для их детей) на бесплатный проезд железнодорожным, водным и воздушным транспортом в пределах СССР».

*Указ Президиума Верховного Совета СССР
«О награждении Героев Социалистического Труда Ванникова Б.Л., Музрукова Б.Г. и Духова Н.Л.
второй золотой медалью «Серп и Молот»
г. Москва, Кремль 29 октября 1949 г.*

Не подлежит опубликованию

За исключительные заслуги перед государством при выполнении специального задания Правительства, дающее право на присвоение звания Героя Социалистического Труда, наградить второй золотой медалью «Серп и Молот» Героев Социалистического Труда:

*ВАННИКОВА Бориса Львовича,
МУЗРУКОВА Бориса Глебовича,
ДУХОВА Николая Леонидовича
Председатель Президиума
Верховного Совета СССР Н. Шверник
Секретарь Президиума
Верховного Совета СССР А. Горкин*

24 сентября 1951 года на Семипалатинском полигоне создатели атомных бомб достигли очередного успеха: они испытали атомную бомбу теперь уже с урановым зарядом. В связи с этим конструкторы и активные участники испытания этой бомбы Ю.Б. Харiton, К.И. Щелкин и Н.Л. Духов были удостоены государственных и правительственные наград. Ю.Б. Харiton и К.И. Щелкин были награждены второй золотой медалью «Серп и Молот» и им была присуждена вторая Сталинская премия первой степени. Н.Л. Духов же, который был уже дважды Героем Социалистического Труда и трижды лауреатом Сталинской премии, был удостоен только очередной, четвертой по счету, Сталинской премии первой степени.

По воспоминаниям сына К.И. Щелкина, Феликса Кирилловича, Кирилл Иванович считал большой несправедливостью, что Николая Леонидовича не наградили в 1951 году очередной, третьей по счету золотой медалью «Серп и Молот» [6, с. 40].

Очередного крупного успеха создатели ядерного оружия достигли 12 августа 1953 года, ког-

да они на том же Семипалатинском полигоне испытали первую в мире водородную бомбу. Этот успех принес Н.Л. Духову ученую степень доктора технических наук, ученое звание члена-корреспондента АН СССР и пятую по счету Сталинскую премию.

В 1954 году Н.Л. Духов как дважды Герой Социалистического Труда Указом Президиума Верховного Совета СССР от 4 января был награжден третьей медалью «Серп и Молот», а как генерал-майору ему Постановлением Совета Министров СССР было присвоено звание генерал-лейтенанта инженерно-технической службы. В этом же году его уже в ранге члена-корреспондента АН СССР, трижды Героя Социалистического Труда, генерал-лейтенанта инженерно-технической службы назначили директором, главным конструктором и научным руководителем филиала № 1 КБ-11 в Москве, созданного на базе завода № 25 МАП (в настоящее время ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова). Создание по Постановлению СМ СССР № 825-3 с/оп от 5 мая 1954 года филиала № 1 знаменовало важный этап в решении атомной проблемы — после первых испытаний атомных и водородных бомб стало известно, что кроме самолетов средствами доставки ядерных боеприпасов могут служить торпеды, баллистические ракеты, крылатые ракеты. Возглавив филиал № 1, Н.Л. Духов определил основные направления его тематики — создание ядерных боеприпасов для стратегических и тактических комплексов ядерного оружия, систем электрического и нейтронного иниции-



Почтовая марка,
посвященная
100-летию Н.Л. Духова

рования ядерных зарядов, приборов автоматики ядерных боеприпасов, унифицированной контрольно-измерительной аппаратуры.

За десять лет под руководством Н.Л. Духова были разработаны три поколения блоков автоматики, первое поколение ядерных боеприпасов для семнадцати различных носителей — баллистических ракет «Р-7», торпеды «Т-5», первых крылатых ракет для ВВС, ВМФ, ПВО; для этих ядерных боеприпасов была разработана целая гамма электромеханических приборов. Для контроля ядерных боеприпасов и блоков автоматики были созданы первые три поколения контрольно-измерительной аппаратуры: осциллографическая, малогабаритная безосциллографическая и автоматизированная с цифровой регистрацией. В связи с этим Н.Л. Духова вполне объективно считают одним из основателей конструкторской школы по ядерным боеприпасам.

Умер Н.Л. Духов после непродолжительной, но тяжелой болезни (рак крови) 1 мая 1964 года и был похоронен в Москве на Новодевичьем кладбище. Памятью немувековечена в названии одной из улиц Полтавы, в его родном селе Веприк установлен бюст. В Челябинске на здании по проспекту Ленина, 15, где в годы Великой Отечественной войны жил Николай Леонидович, установлена мемориальная доска. В 1984 году был выпущен почтовый конверт с маркой, посвященный 80-летию со дня его рождения. К 100-летию Н.Л. Духова были открыты его бюст в галерее ученых ЮУрГУ и памятник на территории ВНИИА, носящего его имя, выпущена почтовая марка с его портретом.

В заключение автор выражает благодарность директору Историко-технического музея СПбГПУ доценту В.Б. Ступаку и другим сотрудникам музея за моральную поддержку и помочь при подготовке настоящего очерка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архив СПбГПУ: личн. дело студ. Лен. маш.-стр. ин-та № 819 (IX, 1928—VII, 1932).
2. **Вишняков, В.А.** Конструкторы [Текст]: Повесть / В.А. Вишняков.— М.: Изд-во ДОСА-АФ, 1990.— 256 с.
3. **Орлов, В.А.** Выбор [Текст] / В.А. Орлов.— М.: Изд-во Политиздат, 1979.— 112 с.
4. **Смелов, В.А.** Политехники: Герои Советского Союза, Герои Социалистического Труда [Текст]: монография / В.А. Смелов.— Л. Изд-во ЛПИ, 1989.— 106 с.
5. Атомный проект СССР. Документы и материалы [Текст] / РФЯЦ— ВНИИЭФ. Саров: 1999. Т. 2. кн. 1.— 719 с.
6. **Щелкин, Ф.К.** Апостолы атомного века. Воспоминания и размышления [Текст] / Ф.К. Щелкин.— М.: ДеЛи прнт, 2004.— 162 с.
7. Конструктор Н.Л. Духов и его школа [Текст]: сборник.— Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 2004.— 448 с.
8. **Сергейчук, В.И.** Николай Духов. Биографическая повесть [Текст]: (на украинском языке) / В.И. Сергейчук.— Киев: Изд-во ЦК ЛКСМУ «Молодь», 1975.— 160 с.

В.Н. Забоин, В.В. Попов

А.И. ВОЛЬДЕК (к столетию со дня рождения)

2 апреля 2011 исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося электротехника, академика АН ЭССР, Заслуженного деятеля науки и техники РФ Александра Ивановича Вольдека. Многие этапы его жизненного пути были тесно связаны с нашим университетом.

В 1938 году А.И. Вольдек успешно окончил Ленинградский индустриальный институт (кото-

рый впоследствии стал называться Ленинградским политехническим институтом им. М.И. Калинина). Затем он прошел обучение в аспирантуре под руководством заведующего кафедрой электрических машин академика АН СССР Михаила Полиевкотовича Костенко, защитил в 1950 году кандидатскую диссертацию «Исследование расстояния в электрических машинах», а в 1957



году — докторскую диссертацию «Исследование индуктивностей рассеяния лобовых частей обмоток электрических машин переменного тока».

С 1950-го по 1961 год А.И. Вольдек работал в Таллинском политехническом институте профессором, заведующим кафедрой электроэнергетики, одновременно являясь (с 1958 года) научным директором Электротехнического НИИ Управления машиностроением СНХ ЭССР.

Работая в Таллинне, Александр Иванович не прерывал творческих и дружеских связей с ЛПИ. Поэтому, когда в 1961 году М.П. Костенко перешел на работу директором созданного им Института электромеханики, он пригласил на работу в ЛПИ одного из своих талантливых и любимых учеников, и в 1961 году А.И. Вольдек был избран профессором и заведующим кафедры электрических машин, которой и руководил до последних дней своей жизни.

Вхождение А.И. Вольдека в коллектив кафедры было естественным и быстрым, поскольку, работая многие годы в Таллинском политехническом институте, он продолжал общение с ее сотрудниками, а также приобрел уже широкую известность как крупный специалист по полевым методам исследования электрических машин и в области создания магнитогидродинамических машин. Его согласие возглавить коллектив кафедры электрических машин было весьма благоприятным и полезным не только для ее дальнейшего развития, но и для отечественного электромашиностроения в целом, поскольку кафедра была традиционно тесно связана с отечественными электротехническими предприятиями и научными учреждениями. При кафедре к тому времени уже успешно действовала проблемная лаборатория. Ее научное направление было главным образом ориентировано на создание электродинамических моделей электроэнергетических систем. За успехи в создании таких моделей руководители и исполнители этой работы впоследствии были удостоены государственных премий. А.И. Вольдек, возглавив кафедру, существенно расширил спектр научных направлений, разрабатываемых в проблемной лаборатории. Под его руководством был создан ряд электрических машин специального назначения, включая электромагнитные насосы, устройства для непрерывной разливки стали и др. Наиболее значительным был вклад А.И. Вольдека в теорию и практику линейных индукционных ма-

шин с бегущей вторичной средой — по сути линейных электродвигателей для электрифицированного транспорта. Им были созданы и до настоящего времени действуют макеты таких двигателей на кафедре. К сожалению, ранний уход из жизни А.И. Вольдека и последующие кризисные процессы в СССР не позволили широко внедрить в практику эти разработки. Однако его фундаментальная монография «Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкотягучим рабочим телом» и заложенные им научные основы теории линейных электродвигателей до настоящего времени не утратили своей актуальности и практической значимости.

Особо надо отметить большую и плодотворную работу А.И. Вольдека по совершенствованию и методическому обеспечению учебного процесса на кафедре и подготовке кадров высшей квалификации. Им был написан ставший классическим и многократно переиздаваемый учебник «Электрические машины», который с 1966 года широко используется для обучения специалистов-электромехаников во многих вузах России и за рубежом. А.И. Вольдек был научным руководителем 28 кандидатских и 2 докторских диссертаций. Его научно-педагогическим кредо было «Единство науки, высшей школы и производства». За время его работы укрепились творческие связи кафедры с ведущим электромашиностроительными предприятиями и научными организациями, в частности с заводом «Электросила», Новочеркасским электровозостроительным заводом, Рижским электромашиностроительным заводом, Таллинским заводом «Вольта», Институтом электромеханики АН СССР, с ВНИИ Электромаш, НИИ КП, НИИ СЭМ и др.

А.И. Вольдек был членом президиума Научно-методического совета МВ и ССО СССР, заместителем председателя Головного совета по электромашиностроению и электрооборудованию МЭП СССР, членом ряда научно-технических советов промышленных предприятий и НИИ, членом экспертной комиссии ВАК по электротехнике, членом редколлегии журнала «Магнитная гидродинамика». Его роль в научно-техническом прогрессе отечественного электромашиностроения широка и значительна. И эта роль высоко оценивалась не только его коллегами и электротехниками страны, но и на государственном уровне. В 1967 году он был удостоен звания Лауреата Государственной пре-



мии Эстонской ССР, а в 1969 году — избран действительным членом АН ЭССР. В 1974 году А.И. Вольдеку было присвоено звание Заслуженного деятеля науки и техники РФ.

А.И. Вольдек много сделал для развития творческих связей кафедры с зарубежными вузами, установив плодотворные контакты с техническими институтами Польши, Германии, Чехии, Венгрии, Китая, Вьетнама и других стран, неоднократно выезжал и выступал в них с докладами и научными сообщениями. Одновременно и представители этих вузов были частыми гостями в ЛПИ им. М.И. Калинина.

Заложенные А.И. Вольдеком научные и учебно-методические принципы и традиции были продолжены его многочисленными учениками и последователями. В 2007 и 2010 годах на кафедре издан двухтомный учебник А.И. Вольдека и В.В. Попова «Электрические машины», основой которого стал учебник А.И. Вольдека.

В знак признания и уважения выдающихся заслуг А.И. Вольдека в столетнюю годовщину со дня его рождения на кафедре электрических машин будет открыта мемориальная доска с участием представителей науки, производства и высшей школы.



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АБАШИН Михаил Иванович — студент-дипломник МГТУ им. Н.Э. Баумана.

107005, Москва, Госпитальный переулок, д. 10. Научно-учебный комплекс «Специальное машиностроение».

(499)-261-36-14

texhelp@mail.ru

АКУЛИЧЕВ Антон Геннадьевич — аспирант кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)552-93-02

anton.akulichev@gmail.com

АКУЛОВ Артем Юрьевич — старший преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве Уральского института Государственной противопожарной службы МЧС России.

620062 Екатеринбург, ул. Мира, д.22, Уральский институт ГПС МЧС России.

(343) 360-80-56

Akulov-07@mail.ru

АЛЕШИНА Алена Сергеевна — аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 9/2, СПбГПУ.

(812) 297 49 90

as_aleshina@mail.ru

АНДРЕЕВ Константин Дмитриевич — кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 552-65-66

turbo@mebil.stu.neva.ru

АНДРЕЕВА Валентина Дмитриевна — кандидат технических наук доцент кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)552-89-69

АРКАНОВ Петр Викторович — преподаватель кафедры пожарной тактики и службы Уральского института Государственной противопожарной службы МЧС России

620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22.

(343) 360-81-79

АТОЯН Грант Левонович — магистр прикладной математики, аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях, научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)294-22-62

ato.bmg@gmail.com

БАБКИН Александр Васильевич — доктор экономических наук профессор кафедры экономики и менеджмента в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)297-18-21

babkin@nic.spbstu.ru

БАРАБАНЩИКОВ Юрий Германович — кандидат технических наук доцент кафедры строительных конструкций и материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 534-12-86

ugb@mail.ru

БАРАКОВСКИХ Сергей Александрович — старший преподаватель кафедры пожарной тактики и службы Уральского института Государственной противопожарной службы МЧС России.

620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22.

(343) 360-81-79

bar0381@yandex.ru

БАРАНОВА Ольга Валерьевна — пресс-секретарь Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)552-69-62

Helga_76@list.ru

БАРЗОВ Александр Александрович — *доктор технических наук профессор кафедры технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана.*

107005, Москва, Гооспитальный переулок, д. 10 Научно-учебный комплекс «Специальное машиностроение».

(499) 261-17-59

galcomputer@rambler.ru

БАСС Максим Станиславович — *кандидат технических наук директор центра трансфера технологий Технопарка Читинского государственного университета.*

672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, ЧитГУ.
(3022) 41-70-85

bms77@mail.ru

БАТУХТИН Андрей Геннадьевич — *кандидат технических наук директор технопарка Читинского государственного университета*

672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, ЧитГУ.
(3022) 41-70-85
cyt3@mail.ru

БЕЛЯНИН Василий Алексеевич — *аспирант факультета комплексной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)297-58-98

БОРОВИКОВ Виктор Александрович — *доктор технических наук профессор кафедры технологии, организации и экономики строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)297-59-49

БУДАШОВ Игорь Александрович — *ведущий инженер-конструктор Рубцовского проектно-конструкторского технологического института.*

658220 Алтайский край, г. Рубцовск, ул. Арычная, д.8, Рубцовский проектно-конструкторский технологический институт.

(385-57) 5-96-79

Budashov_Igor@mail.ru

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — *доктор технических наук профессор, президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, действительный член РАН, Заслуженный деятель науки и техники РФ.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)552-62-40

ВАСИЛЬЕВА Людмила Константиновна — *научный сотрудник научно-исследовательского отдела Санкт-Петербургского торгово-экономического института.*

194021, Санкт-Петербург, Новороссийская ул., д. 50, СПбТЭИ.

(812)752-05-10

ВАСИПОВ Владимир Вячеславович — *студент, лаборант-исследователь научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.*

194021, Санкт-Петербург, Новороссийская ул., д. 50, СПбТЭИ.

(812)306-19-15

ekspertiza.tei@gmail.com

ВИНОКУРОВА Евгения Вячеславовна — *директор Научно-методического центра «Инженерное образование» МГТУ им. Н.Э. Баумана*

105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5.

(499)263-62-12

mgtu@rambler.ru

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — *кандидат технических наук, доктор педагогических наук профессор кафедры технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана.*

107005, Москва, Гооспитальный переулок, д. 10. Научно-учебный комплекс «Специальное машиностроение».

(499) 161-00-61

galcomputer@mail.ru

ГАНЗУЛЕНКО Оксана Юрьевна — *аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов и покрытий Северо-Западного государственного заочного технического университета.*

191186, ул. Миллионная, 5.

(812)710-62-62

ГАПРИНДАШВИЛИ Нона Кахаберовна — *студентка III курса кафедры теоретических основ инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)559-69-55

ГЕОРГИЕВА Юлия Георгиевна — *ведущий инженер-конструктор филиала ОАО «Силовые машины» ЛМЗ.*

195009, Санкт-Петербург, Свердловская наб., д. 18.

(812) 326-73-07

D2199G@yandex.ru



ГЕРАСИМОВ Иван Михайлович — кандидат технических наук доцент кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 534-14-31
fra@nevalink.net

ГОЛОД Валерий Михайлович — кандидат технических наук профессор кафедры физико-химии литьевых сплавов и процессов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 552-72-43
cheshire@front.ru

ГУМЕНЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях (УЗЧС) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)248-91-93
kaf-uzchs@mail.ru

ДЕКТЯРЕВА Раиса Васильевна — доктор исторических наук профессор кафедры истории гуманистического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)552-98-42

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — кандидат технических наук доцент, заместитель заведующего кафедрой колесных и гусеничных машин по учебной работе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)534-14-31
kgm-spb@list.ru

ЕВГРАФОВ Александр Николаевич — кандидат технических наук профессор, заведующий кафедрой теории механизмов и машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 297-48-45

ЕМЕЛЬЯНОВ Константин Игоревич — аспирант кафедры физико-химии литьевых сплавов и процессов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)552-72-43

ЖАРКОВСКИЙ Александр Аркадьевич — доктор технических наук заведующий кафедрой гидромашиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)297-84-30
azharkovsky@pef.spbstu.ru

ЗАБЕЛИН Николай Алексеевич — кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 552-65-66
turbo@mobil.stu.neva.ru

ЗАБОИН Валерий Николаевич — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой электрических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)552-85-30
elmash@mobil.stu.neva

ЗАБРОДИН Алексей Викторович — начальник группы ОАО «ВНИИНМ» им. академика А.А. Бочвара.

123098, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а.
(499)190-80-46

ЗАНДЕР Михаил Сергеевич — аспирант кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 552-65-66
michail.zander@gmail.com

ЗЕЛЕНИН Юрий Владимирович — помощник генерального директора ФГУП ЦНИИ КМ «Промметей».

191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49.
(812) 335-58-52
mail@crism.ru

ИВАНОВ Александр Васильевич — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой полиграфических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812)552-75-26
ivanov@mediabooks.ru

ИВАНОВА Татьяна Юрьевна — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
(812)294-22-62
tjoe@yandex.ru

ИГОЛКИН Борис Иванович — кандидат технических наук старший научный сотрудник научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.

194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская д. 50, СПбТЭИ.
(812)528-20-91
bigolkin@rambler.ru

ИСАБЕКОВ Тилек Асанакунович — кандидат технических наук, докторант Кыргызско-Российского Славянского университета им. Б.Н. Ельцина.
720000, Кыргызстан, г. Бишкек, ул. Киевская, д. 44.
(810-996) 555-270-710
tilek66@gmail.com

КАБАЛЫК Кирилл Алексеевич — студент кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ.
(812)552-65-86
cyrillkabalyk@yahoo.com

КАЖЕНЦЕВ Алексей Витальевич — заместитель директора Дома ученых в Лесном.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)297-21-20

КАЗАКОВ Сергей Павлович — профессор кафедры математики и математического моделирования Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Новокузнецкого филиала-института «Кемеровский государственный университет»

654000 , г. Новокузнецк, пр. Металлургов, 19, НФИ КемГУ, каб. 511.
(3843) 74-64-05
economica@nkfi.ru

КАРПУШИНА Татьяна Игоревна — аспирант кафедры электрической изоляции, кабелей и конденсаторов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, начальник производства ООО «РЭМ энд Коил».

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)-552-8726
allika.karpushina@gmail.com

КЕСАМАНЛЫ Фагам Паша-оглы — доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, Политехническая ул., д. 29.
(812)552-75-31

КЕФЕЛИ Игорь Федорович — доктор философских наук профессор, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, заведующий кафедрой культурологии и глобалистики Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, вице-президент Академии geopolитических проблем, главный редактор журнала «Геополитика и безопасность».

190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 13, БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова.
Тел/факс (812) 251 1720
geokefeli@mail.ru

КИРИЛЛОВ Николай Борисович — доктор технических наук профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 552-75-37, 552-93-02
mmftkm@yandex.ru

КИСЕЛЕВ Владимир Геннадьевич — доктор технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)247-48-28
shtat@mail.ru

КОЗЛОВ Владимир Николаевич — доктор технических наук профессор, советник ректора, заведующий кафедрой системного анализа и управления факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, заместитель председателя Совета УМО вузов России по университетскому политехническому образованию.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)552-80-75

КОКОРИН Валерий Николаевич — кандидат технических наук заведующий кафедрой материаловедения и обработки металлов давлением Ульяновского государственного технического университета.

432027, г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3, 1 учебный корпус, а. 100.
(8422) 41-78-88
vnkokorin@mail.ru



КОЛБАСНИКОВ Николай Георгиевич — доктор технических наук профессор, руководитель научно-исследовательской лаборатории пластометрии, механических свойств и структуры материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
(812)552-89-52
nikolay.kolbasnikov@gmail.ru

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры исследований структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,
СПбГПУ
(812)552-89-69
info@petromspb.ru

КОСМАЧ Валерий Федосеевич — доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
(812) 552-75-31

КРЫЛЛОВИЧ Владислав — доктор технических наук профессор института турбомашин Технического университета г. Лодзь, Польша.

90-924 Lodz, 219/223 Wolczanska str., Poland.
+48 42 631 23 83
hgrzelak@p.lodz.pl

КУДРЯШЕВА Ирина Григорьевна — кандидат технических наук доцент кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,
СПбГПУ
(812)552-77-71
kudr@cef.spbstu.ru

ЛАВРОВ Николай Петрович — доктор технических наук профессор кафедры гидротехнического строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный деятель науки КР.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
(812)297-59-88
n.lavrov@cef.spbstu.ru

ЛИСИН Сергей Кузьмич — доктор технических наук ведущий научный сотрудник, доцент базовой кафедры метрологии при ГНЦ РФ ГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

191186, Россия, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 5,
СЗТУ
(812)335-26-00

МАРКУШКИН Юрий Евгеньевич — заместитель директора отделения ОАО «ВНИИМ» им. академика А.А. Бочвара.

123098, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а.
(499)190-80-46

МАЦКО Ольга Николаевна — аспирант кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29,
СПбГПУ.
(812)552-96-86
xxx-d@list.ru

МЕХТИЕВ Вадим Сейдуллаевич — научный сотрудник научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института, кандидат технических наук.

194021, Санкт-Петербург, Новороссийская ул., д. 50,
СПбТЭИ
vadim.dag@mail.ru

МИРОШНИКОВА Юлия Александровна — аспирант кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,
СПбГПУ.
(812) 552-77-71

МИШИН Василий Викторович — магистр, аспирант кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,
СПбГПУ.
(812)294-42-22
m_v_v_m@mail.ru

МОЛОДКИНА Милана Алексеевна — аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 9/2, СПбГПУ.
(812) 297-49-90
milana-m@nm.ru

МОСКВИН Павел Анатольевич — начальник кафедры автомобильных войск факультета военно-го обучения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.
(812)297-94-60

НЕСТЕРОВА Елена Ивановна — кандидат технических наук доцент заведующая кафедрой прецизионных технологий и сертификации киновидеотехники Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения.

191119 Санкт-Петербург, ул. Правды, 13, СПбГУКиТ.
(812) 315-64-54
nesterovaei@rambler.ru

НИКОЛАЕВ Владимир Геннадьевич — кандидат физико-математических наук директор АНО «Научно-информационный центр “АТМОГРАФ”».
117335, Москва, ул. Профсоюзная, д. 42/4.
(499)-744-41-63
atmograph@gmail.com

НИКОЛАЕВ Юрий Константинович — кандидат технических наук старший научный сотрудник НПК-6 ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».
191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49.
(812)274-16-30
mail@crism.ru

НОВИКОВ Николай Инокентьевич — кандидат экономических наук заведующий кафедрой экономики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Новокузнецкого филиала-института «Кемеровский государственный университет». Заслуженный экономист РФ.
654079, г. Новокузнецк, проспект Металлургов, д. 19 (4 корпус), каб. № 211.
(3843) 74-64-05
economica@nkfi.ru

ПЕТКОВА Ани Петрова — доктор технических наук профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.
(812) 552-75-37, 552-93-02
apetkova@inbox.ru

ПОПОВ Виктор Васильевич — доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.
(812)552-85-30

ПОПОВ Игорь Олегович — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ металлов цветных металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812) 297-21-36
prof.popov@yandex.ru

ПОПОВА Вера Алексеевна — кандидат технических наук помощник проректора по научной работе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, директор Фонда ТВН Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)534-66-10
csu@delfa.net

ПОСПЕЛОВ Александр Юрьевич — аспирант кафедры гидромашиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)297-84-30
PospelovAlex@mail.ru

ПРОХОРОВ Сергей Анатольевич — директор Дома ученых в Лесном
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812) 297-80-32

ПУДАЛОВА Елена Игоревна — кандидат технических наук доцент, ведущий специалист Объединенной авиастроительной корпорации.
101000, Москва, Уланский пер., д. 22, стр. 1.
(495) 926-1420

ПУЛИКОВ Петр Георгиевич — старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории инженерной электрофизики и техники высоких напряжений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, ЭлМФ, кафедра Э, ТВН., СПбГПУ
(812) 555-37-35
pulikov.p@mail.ru

ПУПЫШЕВ Андрей Михайлович — аспирант кафедры теоретических основ металлургии цветных металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812) 297-21-36
lcrfun@rambler.ru

РАССОХИН Виктор Александрович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812) 552-65-66
turbo@mebil.stu.neva.ru



РЕБАНЕ Константин Юрьевич — студент, лауреант-исследователь научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.

194021, Санкт-Петербург, Новороссийская ул., д. 50, СПбТЭИ.
(812)297-97-91

РИНГИНЕН Дмитрий Александрович — аспирант кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
(812)552-80-90

РОЗИН Владимир Фридрихович — бывший заместитель директора Дома ученых в Лесном.

РОЗОВ Андрей Леонидович — доктор технических наук старший научный сотрудник, профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
(812)297-58-98

РОЛЛЕ Владимир Евгеньевич — кандидат технических наук доцент кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
(812)534-14-31

РОМАХОВА Галина Алексеевна — кандидат технических наук доцент кафедры атомных и тепловых энергетических установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ.
(812) 552-76-84
Romakhova@mail.ru

РУДСКОЙ Андрей Иванович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета член-корреспондент РАН.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)552-97-14

РУСИНОВ Ростислав Викторович — доктор технических наук профессор кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)534-14-31
kgm-spb@list.ru

СЕМЁНОВ Александр Георгиевич — кандидат технических наук доцент и ведущий научный сотрудник кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ.
(812)534-14-31
00.agent.007@mail.ru

СЕМЕНОВ Никита Владимирович — аспирант кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ.
(812)534-14-31
nikitkapoliteh@mail.ru

СКУРАТОВ Вячеслав Иванович — секретарь Попечительского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ.
(812)596-27-00

СЛАСТЕНКО Владимир Константинович — кандидат технических наук советник ректора Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по строительству, Заслуженный строитель РФ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)552-67-12
uks@tu.neva.ru

СМАЗНОВ Денис Николаевич — аспирант кафедры технологии, организации и экономики строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)297-59-49
Mazi8@yandex.ru

СМИРНОВ Виталий Владимирович — преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве Уральского института Государственной противопожарной службы МЧС России.

620062 Екатеринбург, ул. Мира, д.22, Уральский институт ГПС МЧС России.
(343) 360-80-56

СНЕЖКО Вера Леонидовна — кандидат технических наук доцент, заведующая кафедрой вычислительной техники и прикладной математики Московского государственного университета природообустройства

127550 Россия, г. Москва, ул.Прянишникова, д. 19, МГУП.
(499)153-97-66
VL_Snejko@mail.ru

СОКОЛОВ Виктор Алексеевич — заместитель директора студенческого клуба Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)295-27-20

СОЛОВЬЕВ Игорь Александрович — директор студенческого клуба Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)295-27-20

СОЛОДИЛОВА Наталья Алексеевна — старший преподаватель кафедры информационно-машиностроительных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)552-95-64
solodna@yandex.ru

СУФИЯРОВ Вадим Шамилевич — аспирант кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)552-89-69

СЫРОВ Александр Александрович — аспирант, ассистент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях, научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
812 294-22-62
syrov_aleksandr@mail.ru

ТЕРЁШИН Валерий Алексеевич — кандидат технических наук доцент кафедры теории механизмов и машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ
(812) 297-48-45.

ТРЕБУНСКИХ Сергей Анатольевич — кандидат технических наук доцент кафедры тепловых электрических станций Читинского государственного университета.

672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, ЧитГУ.
(3022) 41-70-85
сyt3@mail.ru

ТРЕЩЁВ Дмитрий Алексеевич — аспирант кафедры атомных и тепловых энергетических установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812) 552-76-84
Treschew@yandex.ru

ТРИНЧЕНКО Алексей Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры реакторо- и парогенераторостроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)552-65-91
trinchenko@mail.ru

ТРОФИМОВ Валерий Васильевич — кандидат физико-математических наук профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)552-67-26
vtrofimov@mail.ru

ТРОСЬКО Игорь Усяславович — соискатель кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812)552-80-75

ФЕДОСОВ Евгений Александрович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрами в МФТИ и в МИРЭА, научный руководитель и первый заместитель генерального директора ФГУП «ГосНИИАС», Заслуженный деятель науки РФ, академик РАН , академик Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН), член президиума РАРАН, редактор журнала «Известия РАН. Теория и системы управления».

125319, г. Москва, ул. Викторенко, 7.
(499)157-70-47
fedosov@gosniias.ru

ФЕДОТОВ Алексей Иванович — доктор технических наук профессор, президент Санкт-Петербургской инженерной академии, заместитель председателя Попечительского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
(812) 596-27-00



ХРОСТИЦКИЙ Александр Аркадьевич — аспирант кафедры теории механизмов и машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 297-48-45

hs2@mail.ru

ЧЕЛПАНОВ Игорь Борисович — доктор технических наук профессор кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный деятель науки РФ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 552-96-86

igorhelp@yandex..ru

ЧЕРНИКОВ Виктор Александрович — кандидат технических наук, профессор кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 552-65-66

chern@mebil.stu.neva.ru

ЧУЛКИН Сергей Георгиевич — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 534-12-86

uwc99@mail.ru

ШИШОВ Иван Александрович — аспирант, кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ.

(812) 552-80-90

ШУТЕЕВ Вячеслав Александрович — аспирант, преподаватель кафедры инженерного бизнеса и менеджмента МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 7

(499) 267-17-32

baumanmstu@gmail.com

ЯКОВИЦКАЯ Марина Валентиновна — заведующая лабораторией кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

(812) 552-75-37, 552-93-02

mmftkm@yandex.ru

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Федосов Е. А. АВИАЦИОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ.

Статья посвящена истории создания авиации в СССР и России в течение столетия, а также основным тенденциям развития и совершенствования российской авиационной промышленности в предвоенные годы, годы Великой Отечественной войны, в послевоенные годы и в настоящее время.

АВИАЦИЯ. АВИАСТРОЕНИЕ. САМОЛЕТЫ. АВИАЦИОННАЯ ТЕХНИКА. ПРЕДПРИЯТИЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

Козлов В. Н., Тросько И. У. АНАЛИЗ ХАОТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

В работе рассматривается математическая модель электроэнергетической системы, включающая в себя модель синхронного генератора, турбины и линии передачи. Показано, что при некоторых предположениях относительно параметров, входящих в модель системы, в ней возникает хаотический режим, характеризующийся быстро нарастающими и неуправляемыми колебаниями фазовых координат. Отмечена важность диагностики подобных процессов с целью своевременного изменения структуры системы или логики управления.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ХАОТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ. СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР. ТУРБИНА. ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧ.

Андреев К. Д., Забелин Н. А., Рассохин В. А. ВЫБОР ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТИПА НК-16СТ.

Рассматривается возможность создания паротурбинной установки для работы в составе комбинированной парогазовой установки на базе газотурбинного двигателя НК-16СТ с котлом-utiлизатором.

КОМБИНИРОВАННАЯ УСТАНОВКА. ПАРОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА. ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. ПАРОВАЯ ТУРБИНА.

Поспелов А. Ю., Георгиева Ю. Г., Жарковский А. А. ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ В ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЕ ГИДРОТУРБИНЫ ГЭС.

В работе приведены результаты численного исследования течения в отсасывающей трубе гидротурбины ГЭС Платановриси. Расчет течения проводился на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с использованием гидродинамического программного комплекса *Fluent*. Проведено сравнение результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными. Исследования проводились с целью верификации результатов.

ОТСАСЫВАЮЩАЯ ТРУБА. ГИДРОТУРБИНА. РАСЧЕТ. ТРЕХМЕРНОЕ. ВЯЗКОЕ. ТЕЧЕНИЕ. СРАВНЕНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТ.

Зандер М. С., Черников В. А. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛОКА «СТУПЕНЬ – ВЫХОДНОЙ ДИФФУЗОР» СТАЦИОНАРНОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЕЕ РАБОТЫ.

В статье приведены результаты экспериментального исследования модели турбинной ступени без бандажа с выходным осевым диффузором газовой турбины большой мощности. Рассмотрено влияние режимных параметров работы ступени на эффективность диффузора. Предложена методика оценки эффективности блока «турбинная ступень – выходной диффузор», которая проиллюстрирована на примере влияния силовых стоек заднего подшипника, расположенных в диффузоре, на КПД блока «ступень – диффузор».

ДИФФУЗОР. ЭКСПЕРИМЕНТ. ТУРБИННАЯ СТУПЕНЬ. ТУРБИНА. КПД. ВЫХЛОПНОЙ ПАТРУБОК.



Николаев В. Г. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РОССИИ.

В статье описаны информационная база, авторская методика и результаты определения и анализа ветроэнергетических ресурсов России. Изучены основные закономерности и особенности пространственной и временной изменчивости ВЭР на территории России, определены количественные характеристики ВЭР в разных регионах страны с оценкой их пригодности для практического использования применительно к современным ВЭУ.

ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА. ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ. ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СТАНЦИИ. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ МАЧТА.

Ромахова Г. А., Трещёв Д. А. ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА ОТ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ НА ПАРОГАЗОВЫХ И ГАЗОТУРБИННЫХ ТЭЦ.

В статье рассмотрена относительная экономия топлива за счет комбинированной выработки тепловой и электрической энергии на парогазовых и газотурбинных ТЭЦ. Показана возможность использования относительной экономии топлива по сравнению с вариантом раздельной выработки в качестве одного из критериев оптимизации теплофикационной ПГУ на базе системного подхода. Получена зависимость относительной экономии топлива от показателей работы когенерационной установки. Выявлено, что ПГУ—ТЭЦ обеспечивают существенно большую, чем установки других типов, экономию топлива по сравнению с раздельной выработкой.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД. ТЕПЛОФИКАЦИОННАЯ ПАРОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА. ТЕПЛОФИКАЦИОННАЯ ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА. КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ. ЗАМЕЩАЕМАЯ КЭС.

Молодкина М. А. ТЕПЛОВОЙ НАСОС В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА.

В статье исследуется возможность повышения энергетической эффективности парогазовых тепловых электростанций путем внедрения теплового насоса в схему оборотного водоснабжения и частичной утилизации низкопотенциальной теплоты продувки градирни. Рассчитаны характеристики теплового насоса, внедряемого в схему. Проведен анализ трех возможных режимов работы конденсатора теплового насоса с выявлением наиболее эффективного.

ПАРОГАЗОВЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ. ТЕПЛОВОЙ НАСОС. ОБОРОТНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ. РЕЖИМЫ РАБОТЫ. КОЭФФИЦИЕНТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ.

Басс М. С. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЕКТОВ (НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ).

В статье приведена технико-экономическая оценка эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий в Забайкальском крае. Рассмотрены сроки окупаемости внедрения энергосберегающих мероприятий для комплекса источник — тепловая сеть — потребитель.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ИСТОЧНИК. КОТЕЛЬНАЯ. ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ. ТЕПЛОПОТЕРИ. ПОТРЕБИТЕЛЬ.

Требунских С. А., Батухтин А. Г. ЭНТРОПИЙНАЯ ЭФФЕКТИВНОТЬ ТЕПЛОПОТРЕБЛЯЮЩИХ ОБЪЕКТОВ.

В статье рассмотрен метод определения энтропийной эффективности объектов, потребляющих тепловую энергию. Приведены примеры энтропийной эффективности отапливаемого помещения, прямого цикла и цикла теплового насоса.

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

Алешина А. С. ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЕ.

Произведен анализ тепловых схем газогенераторных электростанций. Приведен состав оборудования, представлены технические характеристики. Даны характеристики получаемого генераторного газа и пути его использования.

БИОМАССА. ГАЗИФИКАЦИЯ. ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ГАЗОГЕНЕРАТОР.

Тринченко А. А. СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СТУПЕНЧАТОМ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА.

Работа посвящена решению проблем борьбы с выбросами оксидов азота при сжигании твердого топлива в топках парогенераторов. Рассмотрены способ ступенчатого сжигания топлива и технологический метод разложения оксидов азота на поверхности углеродных частиц. Предложена методика расчета образования оксидов азота при использовании ступенчатого сжигания, проводится анализ соответствия опытных данных расчетным, определяется область использования результатов работы.

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ. ОКСИДЫ АЗОТА.

Кудряшева И. Г., Мирошникова Ю. А. О ЗНАЧЕНИИ ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ УКРАИНЫ.

В статье дан анализ режимов работы электростанций и показана роль гидроаккумулирующих станций в энергосистеме Украины. Рассмотрены перспективы развития энергосистемы за счет снижения доли генерации тепловых электростанций и строительства гидроаккумулирующих электростанций.

ЭНЕРГОСИСТЕМА. ОПТИМИЗАЦИЯ. СИСТЕМНЫЕ УСЛУГИ. ТАРИФНАЯ ПОЛИТИКА.

Киселёв В. Г. ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННЫХ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ.

В статье рассмотрены и классифицированы основные методы защиты от коррозии постоянными блуждающими токами подземных металлических сооружений. Определены особенности их применения в рамках ГОСТ 9.602 – 2005.

КОРРОЗИЯ. ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. КРИТЕРИИ ЗАЩИЩЕННОСТИ. КРИТЕРИИ НЕОБХОДИМОСТИ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА.

Николаев В. Г. МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ.

В статье описаны методические основы и результаты разработки автором моделей многолетней изменчивости вероятностей и длительности технических, регламентных и ремонтных простоев и технической готовности ветроэлектрических станций и их использования для анализа изменения технической надежности и энергопродуктивности ВЭС на протяжении их 20-летнего ресурсного периода.

ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ. РЕМОНТНЫЕ ПРОСТОИ. ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ГОТОВНОСТЬ. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ.

Карпушина Т. И. СЛЮДОСОДЕРЖАЩАЯ ИЗОЛЯЦИЯ НОВЫХ ТИПОВ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ТЕПЛОВОГО СТАРЕНИЯ.

Статья посвящена изучению характеристик изоляции новых типов проводов для высоковольтных электрических машин. Приведены результаты исследования электрической прочности, частичных разрядов и тангенса угла диэлектрических потерь изоляции данных проводов. Подробно рассмотрено влияние теплового старения на тангенс угла диэлектрических потерь в слюдосодержащей витковой изоляции.

ВИТКОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ. ОБМОТОЧНЫЙ ПРОВОД. ТАНГЕНС УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ. СТАТОРНЫЕ КАТУШКИ. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ.

Пуликов П. Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ ФТОРОПЛАСТОВУЮ ПЛЕНКУ.

В статье представлены результаты расчета коэффициента диффузии водорода через фторопластовую пленку в зависимости от температуры масла, что можно использовать в системах мониторинга трансформаторов.

ТРАНСФОРМАТОР. МОНИТОРИНГ. ДИФФУЗИЯ. РАСТВОРЕННЫЕ ГАЗЫ. ПОЛИМЕРНЫЕ МЕМБРАНЫ.

Абашин М. И., Барзов А. А., Галиновский А. Л., Шутеев В. А. УЛЬТРАСТРУЙНАЯ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ.

В статье рассмотрены новые области реализации гидроструйных технологий, в частности ультраструйная диагностика материалов. Показано, что данный способ диагностирования имеет широкие перспективы для реализации в области машиностроения. Отмечена положительная особенность ультраструйной диагностики, заключающаяся в обеспечении принципа подобия между эксплуатационно-технологическим и контрольно-диагностическим взаимодействиями.

ГИДРОСТРУЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. УЛЬТРАСТРУЙНАЯ ДИАГНОСТИКА. ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ



Русинов Р. В., Добрецов Р. Ю., Герасимов И. М. ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОГО ЦИКЛА «АДИАБАТНОГО» ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.

Рассмотрен вопрос тепловой эффективности рабочего цикла «адиабатного» двигателя.
ДИЗЕЛЬ. РАБОЧИЙ ЦИКЛ. ЭКОНОМИЧНОСТЬ. АДИАБАТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ.

Семёнов Н. В., Ролле В. Е. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ С УЧЁТОМ ПОПЕРЕЧНО-УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ КУЗОВА.

Рассмотрена методика расчета параметров подвески на примере легкового автомобиля среднего класса. В методике учтены не только поперечно-угловые перемещения, но и ускорения кузова. В результате применения методики повышается точность расчета угловых колебаний кузова автомобиля, что позволяет на стадии проектирования обоснованно выбирать параметры подвески автомобиля.

ПОДВЕСКА АВТОМОБИЛЯ. СТАБИЛИЗАТОР ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ. ПОПЕРЕЧНО-УГЛОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ. УГЛОВАЯ ЖЁСТКОСТЬ.

Солодилова Н. А., Челпанов И. Б. ТРЕХМЕРНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМ.

В статье рассмотрены проблемы создания языка трехмерного отображения элементов схем. Анализируются проблемы изображения трехмерных элементов схем для различных видов схематизируемых объектов.

ТРЕХМЕРНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА. ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА. ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.

Мацко О. Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНОГО ПРУЖИННОГО АККУМУЛЯТОРА С ПОСТУПАТЕЛЬНОЙ ПАРОЙ.

В статье представлены результаты разработки технической идеологии создания мехатронных пневматических рекуперативных приводов для возвратно-поступательных перемещений с использованием пружинных аккумуляторов, имеющих нелинейные силовые характеристики в функции от величины перемещения.

НЕЛИНЕЙНЫЙ ПРУЖИННЫЙ АККУМУЛЯТОР. ПОСТУПАТЕЛЬНАЯ ПАРА. РЕКУПЕРАТИВНЫЙ ПРИВОД. ПРУЖИНА. УСИЛИЕ ПРУЖИНЫ.

Будашов И. А. МОЩНОСТЬ РЕЗАНИЯ РОТАЦИОННО-ДИСКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР.

В статье дан последовательный вывод формулы мощности резания толстостебельных культур ротационно-дисковым измельчителем. Формулы мощности представлены в развернутом виде в зависимости не только от принципа среза, но и от основных параметров конструкции измельчителя и режимов измельчения.

МОЩНОСТЬ. СИЛА РЕЗАНИЯ. ПОДПОРНОЕ И БЕСПОДПОРНОЕ РЕЗАНИЕ. ЛЕЗВИЕ. РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ.

Хростицкий А. А., Евграфов А. Н., Терёшин В. А. ГЕОМЕТРИЯ И КИНЕМАТИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ШЕСТИЗВЕННИКА С ИЗБЫТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ.

Исследован пространственный шестизвенный механизм с избыточной связью. Выявлены структурные особенности механизма, определено количество избыточных связей, рассчитаны геометрические и кинематические параметры, исследованы соответствующие характеристики.

МЕХАНИЗМ. ИЗБЫТОЧНЫЕ СВЯЗИ. СТРУКТУРА. ГЕОМЕТРИЯ. КИНЕМАТИКА.

Гапринашли Н. К., Семёнов А. Г. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ИСКУССТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.

Приведены разработанные авторами на базе лучших технических достижений в области тепличного оборудования и технологий с их использованием инновационные предложения (варианты) по дальнейшему прогрессу в этой научноемкой области.

РАСТЕНИЕВОДСТВО. СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО. ИСКУССТВЕННЫЙ КЛИМАТ. ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ. ТЕПЛИЦА.

Рудской А. И., Кондратьев С. Ю., Кокорин В. Н. НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ.

Разработана технология введения металлических наноматериалов в матрицу-основу с последующим объемным формообразованием с использованием эффекта сверхпластичности, что позволит получать изделия сложной пространственной формы с высоким уровнем физико-механических свойств.

НАНОМАТЕРИАЛЫ. НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ. СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ. ФИЛЬТР. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ. НАНОФАЗА. МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ПОРОШОК. ДЕФОРМИРОВАНИЕ.

Барабанщиков Ю. Г., Чулкин С. Г. АНИЗОТРОПИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ КЕРАМИЧЕСКОЙ МАССЫ ПРИ ТРЕНИИ.

Приведены результаты испытаний керамической массы на трение. Установлено, что электропроводность керамической массы при скольжении по металлическому электроду зависит от направления тока. Эффект частичного выпрямления переменного тока зависит от скорости скольжения и металла электродов.

ТРЕНИЕ. КЕРАМИЧЕСКАЯ МАССА. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ. ТРИБО-ЭДС. ВЫПРЯМЛЕНИЕ ТОКА.

Рудской А. И., Колбасников Н. Г., Рингинен Д. А. ПОЛУЧЕНИЕ СУБМИКРОННОЙ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ ГОРЯЧЕЙ И ТЕПЛОЙ ДЕФОРМАЦИИ.

С использованием модуля MaxStrain комплекса Gleeble-3800 исследовано формирование структуры и механических свойств нескольких сталей и сплавов, в том числе новых трубных сталей категории прочности X90–X100, после больших пластических деформаций при температурах 1100–400 °C, титана, алюминиевого сплава. С использованием модуля Torsion определены температуры преципитации карбонитридов микролегирующих элементов и температура старта распада аустенита. Исследовано несколько режимов термо-механической обработки, включающей стадии деформации выше и ниже температуры преципитации, деформацию в двухфазной ферритно-аустенитной области и при температурах бейнитных превращений.

В зависимости от режимов обработки получена различная структура образцов с размерами зерен от 0,5–2 мкм до 50–150 нм. Исследованы механические свойства обработанного металла и показан вклад изменения размера зерна в упрочнение.

СУБМИКРОННАЯ СТРУКТУРА. НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА. ГОРЯЧАЯ ДЕФОРМАЦИЯ. ТЕПЛАЯ ДЕФОРМАЦИЯ. МАТАЛЛ. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Голод В. М., Емельянов К. И. КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕТИКИ И ПОЛНОТЫ ПЕРИТЕКТИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ.

Разработана компьютерная модель перитектического превращения при неравновесной кристаллизации сплавов на основе сопряженного анализа тепловых, кристаллизационных и диффузионных процессов. Приведены результаты анализа условий, контролирующих полноту реализации перитектического превращения при затвердевании отливок из углеродистых и нержавеющих сталей и алюминиевых сплавов при формировании микроструктуры сплавов перитектического типа.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ. ПЕРИТЕКТИЧЕСКОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ. НЕРАВНОВЕСНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ. МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВОВ. ЗАТВЕРДЕВАНИЕ СТАЛИ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.

Колбасников Н. Г., Мишин В. В., Шишов И. А., Забродин А. В., Маркушкин Ю. Е. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТОЙ НАНОСТРУКТУРНОЙ БЕРИЛЛИЕВОЙ ГУБКИ.

Гидридная технология производства высокочистого бериллия включает в себя осадку высокопористой бериллиевой губки в металлической оболочке при температуре 700 °C в вакууме с целью получения заготовки для горячей прокатки. В результате этого процесса форма заготовки бериллия представляет собою двояковогнутую линзу, сохраняющуюся при горячей прокатке в чехлах. Такая форма заготовки нежелательна, ибо приводит к неравномерности деформации при прокатке и как следствие к разрушению бериллия. В данной работе при помощи метода конечных элементов исследовано компактирование высокопористой губки бериллия. Произведено сравнение результатов моделирования с реальной осадкой на прессе, отмечено высокое сходство модели с данными эксперимента. Выявлены причины появления нежелательной разнотолщины заготовки бериллия и разработаны рекомендации по ее устранению.

ГИДРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ. НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ БЕРИЛЛИЙ. НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА. ПРОКАТКА БЕРИЛЛИЯ В КОНТЕЙНЕРЕ. ПОЛУЧЕНИЕ ФОЛЬГИ ИЗ БЕРИЛЛИЯ.

Ганзуленко О. Ю., Кириллов Н. Б., Петкова А. П., Яковицкая М. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТИ И ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ.

Выявлены концентрационные и температурные зависимости проницаемости водорода сквозь предлагаемую сталь и аналоги. Получена математическая модель зависимости водородопроницаемости предлагаемой стали и аналогов в интервале температур 300–700 °C. На базе сравнительного анализа основных эксплуатационных и технологических характеристик предлагаемой стали и существующих аналогов рекомендовано ее применение для изготовления тонкостенных конструкций высокотемпературных технологических систем атомной и водородной энергетики, подвергающихся длительному воздействию различных водородосодержащих сред.

ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ. АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ.



Пупышев А. М., Попов И. О. ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ ЖЕЛЕЗО-ТИТАНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ УГЛЕРОДОМ КОКСА И ЖИДКИМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ.

Исследованы механизмы и макрокинетика разработанного газогенераторного метода восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов в системе «железо-титановый концентрат – пленка жидкого углеводородного топлива (C_nH_m) + углерод» в сравнении с фундаментально изученной системой «железо-титановый концентрат – углерод».

ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЙ МЕТОД. ИЛЬМЕНИТ. ТИТАНОМАГНЕТИТ. ВОССТАНОВЛЕНИЕ. УГЛЕВОДОРОД. МАКРОКИНЕТИКА.

Николаев Ю. К., Зеленин Ю. В., Кондратьев С. Ю. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ.

В статье рассмотрены причины хрупкого разрушения сварных соединений из хромоникелевых аустенитных сталей в процессе эксплуатации при повышенных температурах. Показано, что образование относительно высокого количества сигма-фазы в структуре металла шва и свариваемой стали приводит к охрупчиванию. Сформулированы необходимые условия для предотвращения возможности хрупкого разрушения сварных соединений из аустенитных сталей при высокотемпературной эксплуатации.

АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ. МИКРОСТРУКТУРА. ТЕПЛОВОЕ СТАРЕНИЕ. ХРУПКИЕ РАЗРУШЕНИЯ. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.

Акуличев А. Г., Андреева В. Д., Трофимов В. В. СУБСТРУКТУРА НИТРОЦЕМЕНТОВАННОЙ СТАЛИ 20Х3МВФ-Ш ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ.

Современным методом полнопрофильного анализа рентгенограмм проведено послойное исследование тонкой структуры нитроцементованной стали 20Х3МВФ-ш после различных термических обработок. Показано изменение параметров субмикрокристаллической структуры основных фаз в зависимости от глубины слоя. Дано объяснение немонотонности зависимостей параметров субструктур в нитроцементованной стали.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ. ПОЛНОПРОФИЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕНТГЕНОГРАММ. СУБСТРУКТУРА.

Мишин В. В., Шишов И. А., Забродин А. В., Маркушкин Ю. Е. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КРИТЕРИЯ, ОПИСЫВАЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЕ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ.

Одним из наиболее сложных переделов при изготовлении фольги из высокочистого нанокристаллического бериллия является холодная прокатка горячеупрессованного и горячекатаного бериллия толщиной 200–500 мкм. Любая неравномерность деформации по ширине и длине очага деформации существенно снижает технологическую пластичность бериллия и может вызывать разрушение. В работе проведен анализ и разработан критерий разрушения, который можно использовать для выбора режимов пластической деформации малопластичных материалов.

ГИДРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ. НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ БЕРИЛЛИЙ. НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА. МАЛОПЛАСТИЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ. КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ. ХОЛОДНАЯ ПРОКАТКА БЕРИЛЛИЯ. ПОЛУЧЕНИЕ ФОЛЬГИ ИЗ БЕРИЛЛИЯ.

Суфияров В. Ш., Голод В. М. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОЛОГИИ ФРОНТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ.

Разработан алгоритм оценки морфологии фронта кристаллизации многокомпонентных сплавов при последовательном переходе от плоского фронта к ячеистой и дендритной структуре. Приведены результаты анализа условий, контролирующих морфологические переходы при формировании микроструктуры отливок из углеродистых и низколегированных сталей. Данна сравнительная оценка влияния компонентов стали на формирование ячеистой и дендритной микроструктуры.

ФРОНТ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ. ПЛОСКИЙ ФРОНТ. ЯЧЕИСТАЯ СТРУКТУРА. ДЕНДРИТНАЯ СТРУКТУРА. НИЗКОЛЕГИРОВАННАЯ СТАЛЬ.

Попов И. О., Пупышев А. М. ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЙ МЕТОД СЕЛЕКТИВНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ ЖЕЛЕЗО-ТИТАНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ.

Статья посвящена созданию новой эффективной комплексной технологии переработки ильменитовых и титаномагнетитовых концентратов Кольского полуострова. В основе технологии лежит разработанный газогенераторный метод селективного восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов с использованием в качестве восстановителя жидкое углеводородное топливо.

ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЙ МЕТОД. ИЛЬМЕНИТ. ТИТАНОМАГНЕТИТ. ВОССТАНОВЛЕНИЕ. УГЛЕВОДОРОД.

Новиков Н. И., Казаков С. П. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ДИВЕРСИФИКАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.

В статье исследованы способы количественной оценки направлений диверсификации металлургического производства, их математическая интерпретация, позитивные и негативные моменты. На основе статистической и бухгалтерской отчетности крупнейших металлургических компаний и предприятий РФ выполнена оценка уровня их диверсификации с использованием различных способов его измерения.

СТРАТЕГИЯ. ДИВЕРСИФИКАЦИЯ. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА. ОБЪЕМ ПРОИЗВОДСТВА. БИЗНЕС. СЕГМЕНТ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ. ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ПРОЕКТ.

Москвин П. А. БИОТОПЛИВО ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ И ПРОБЛЕМА ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ.

Рассматриваются различные виды биотоплива для автомобилей, их положительные и отрицательные стороны, проблемы применения биотоплива из различного сырья.

БИОТОПЛИВО. ПРОИЗВОДСТВО БИОГАЗА. БИОЭТАНОЛ – БИОТОПЛИВНЫЙ ЗАМЕНİТЕЛЬ БЕНЗИНА. БИОДИЗЕЛЬ – БИОТОПЛИВНЫЙ ЗАМЕНİТЕЛЬ ДИЗЕЛЯ.

Исабеков Т. А., Лавров Н. П. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОРASПРЕДЕЛЕНИЕМ НА ТРАНСГРАНИЧНОМ ЧУМЫШСКОМ ГИДРОУЗЛЕ.

Рассмотрена модель управления процессами распределением воды между Кыргызстаном и Казахстаном на Чумышском гидроузле. Предложена рациональная схема манипулирования затворами плотины.

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ. ЧУМЫШСКИЙ ГИДРОУЗЕЛ. ВОДНЫЙ БАЛАНС. МАНИПУЛИРОВАНИЕ ЗАТВОРАМИ.

Иголкин Б. И., Васильева Л. К., Мехтиев В. С., Васипов В. В., Ребане К. Ю. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ.

В статье показано, что частотно-температурные кривые проводимости различных растительных масел в координатах электропроводность — частота имеют точку пересечения, положение которой, а также характер самих кривых могут служить основой для создания оперативного метода оценки состояния (качества) жидких растительных масел.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ. РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАСЛА. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ. ЧАСТОТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ.

Кефели И. Ф. ГЛОБАЛЬНОЕ ОРУЖИЕ: ПРЕДЫСТОРИЯ И РЕАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОСТИ.

Статья посвящена современному глобальному оружию, его видам и применению. Рассматривается история появления ядерного оружия и то время, когда стала очевидной необходимость его сокращения и контроля. Проводится анализ концепции «Быстрого глобального удара». Обсуждается проблема политического и стратегического доминирования в мире, а также роль глобального оружия в борьбе за это доминирование и опасность его дальнейшего развития.

ГЛОБАЛИЗАЦИЯ. ГЛОБАЛЬНОЕ ОРУЖИЕ. СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ. НЕСТРАТЕГИЧЕСКОЕ ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ. «БЫСТРЫЙ ГЛОБАЛЬНЫЙ УДАР». «СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКАЯ ВОЙНА».

Бараковских С. А., Арканов П. В. ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВНОЙ СРЕДЫ ОГНЕЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОЖАРАХ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТАХ.

Исследованы теплофизические свойства конструкций поглощающих тепловое излучение при пожарах на объектах нефтегазовой промышленности. Предложены конструкции противопожарной защиты на основе воздушно-механической пены и твердых материалов.

ИЗЛУЧЕНИЕ, ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ПЕНА, ОГНЕЗАЩИТНАЯ КОНСТРУКЦИЯ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ПЛОТНОСТЬ, ТЕПЛОЕМКОСТЬ.

Гуменюк В. И., Атоян Г. Л., Сыров А. А. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ И МИНИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР.

В статье построена математическая модель защищенности в применении к перегрузочной машине, используемой при перегрузке ядерного топлива на АЭС с реакторами типа ВВЭР.

С помощью созданной авторами программы для двух разных моделей разрушения (износа) троса рабочей штанги перегрузочной машины методом имитационного моделирования вычислены средние



суммарные затраты на полный процесс перегрузки ЯТ при условии поддержания индекса защищенности (вероятности разрушения) на заданном уровне. Определены средние суммарные затраты при различных значениях критического параметра системы — вероятности разрушения троса, найден минимум этих затрат для двух моделей разрушения.

АЭС. ВОДО-ВОДЯНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР. МАШИНА ПЕРЕГРУЗОЧНАЯ. ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО. ОПАСНОСТЬ. БЕЗОПАСНОСТЬ. АВАРИЯ. РИСК. ЗАЩИЩЕННОСТЬ. ИНДЕКС ЗАЩИЩЕННОСТИ. МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ. ДЕГРАДАЦИЯ. ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ. КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЙ ОБЪЕКТ. ТРОС РАБОЧЕЙ ШТАНГИ. ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩАЯ СБОРКА. ТВЭЛ.

Розов А. Л., Белянин В. А. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭКОНОМИКИ И СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРЫ В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ.

Анализируются проблемы, связанные с принятием управлеченческих решений при планировании проверок состояния пожарной безопасности объектов, а также определением основных показателей, влияющих на вероятности возникновения загораний на объектах защиты. Для роста основных показателей используется теория вероятностей.

ПЛАНОВЫЕ ПРОВЕРКИ. ИСТОЧНИКИ ЗАЖИГАНИЯ. ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР. УГРОЗА ПОЖАРА (ЗАГОРАНИЯ). ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРА (ЗАГОРАНИЯ). ИСТОЧНИКИ ЗАЖИГАНИЯ. ЗАГОРАНИЕ.

Иванова Т. Ю. ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ.

В статье рассмотрены известные методики оценки объемов возможных аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, выявлены их положительные особенности и недостатки. Предложен более рациональный способ оценки вероятности истечения нефти.

ОБЪЕМ. НЕФТЬ. ТРУБОПРОВОД. ВЕРОЯТНОСТЬ. ИСТЕЧЕНИЕ. РАЗРЫВ. ПРОКОЛ.

Акулов А. Ю., Смирнов В. В. АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВНИЯ ОГНЕЗАЩИТНОГО СОСТАВА ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА.

В статье обоснована необходимость разработки огнезащитного состава для металлических конструкций нефтегазовой отрасли. Приведены методика и алгоритм проектирования огнезащитных составов.

ОГНЕСТОЙКОСТЬ. ОГНЕЗАЩИТНЫЙ СОСТАВ. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ. АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ.

Боровиков В. А., Сластенко В. К. НОВЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА.

Рассмотрен вопрос оценки эффективности действия взрыва промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) в горных породах и твердых средах различной акустической жесткости. Приведены сведения об особенностях распределения потенциальной энергии заряда в зависимости от физико-механических свойств среды, подвергшейся действию взрыва. Предложен новый способ определения эффективности ПВВ, учитывающий диссиpативные потери энергии взрыва, зависящие от акустической жесткости разрушающей твердой среды и импеданса продуктов детонации. Приведена методика измерения параметров преломленной в воду волны напряжений с помощью пьезоэлектрических датчиков давления и комплекса измерительной аппаратуры. Представлены результаты экспериментальных измерений двух типов ПВВ, существенно различающихся по детонационным характеристикам — гранулита-Ж и малоплотного гранулита-ПЖ, взорванных в бетонных блоках, моделирующих породы средней акустической жесткости.

ВЗРЫВЧАТОЕ ВЕЩЕСТВО. АКУСТИЧЕСКАЯ ЖЕСТКОСТЬ. МЕТОД ПРЕЛОМЛЕННОЙ В ВОДУ ВОЛНЫ. ПАРАМЕТРЫ ВОЛНЫ НАПРЯЖЕНИЙ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА.

Космач В. Ф. КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АБСОЛЮТНОЙ ШКАЛЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ЛЕТОИСЧИСЛЕНИЯ ЗЕМЛИ.

Предложен квантово-механический метод анализа геологической истории Земли, на основании которого найдены адекватные эксперименту длительности эпохи за последние $550 \cdot 10^6$ лет и предсказана длительность новейшей эпохи.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭПОХА. ЗЕМЛЯ. КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА.

Кабалык К. А., Крылович В. ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА В СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА.

Трехмерный численный анализ течения вязкого газа применен для получения радиального распределения угла потока в абсолютном движении перед рабочим колесом и для расчета безразмерной характеристики ступени. Исследовано влияние качества расчетной сетки, модели турбулентности и интенсивности входной турбулентности на результаты расчетов. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КОМПРЕССОР. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СЕТОЧНАЯ НЕЗАВИСИМОСТЬ. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ.

Смазнов Д. Н. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЕК ЗАМКНУТОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ.

В статье рассмотрены замкнутые профили и деформации сдвига, вопросы сдвиговых усилий и напряжений и проведения аналогий для разработки адекватных моделей для холодногнутых профилей из высокопрочной стали с толщинами менее 1,0 мм.

КРИТИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА. УСТОЙЧИВОСТЬ. ТОКОСТЕННЫЕ ХОЛОДНОГНУТЫЕ ПРОФИЛИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ФОРМЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ.

Барabanчиков Ю. Г., Чулкин С. Г. ТРЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ПОРТЛАНД-ЦЕМЕНТА.

Путем экспериментальных исследований установлены особенности процесса трения дисперсных смесей на основе портланд-цемента по металлической поверхности. Установлено, что существует критическое значение прижимающей силы, ниже которого имеет место течение в объеме смеси, а выше — только скольжение по поверхности.

ТРЕНИЕ. ПОРТЛАНД-ЦЕМЕНТ. ДИСПЕРСНАЯ СМЕСЬ. ВОДОЦЕМЕНТНОЕ ОТНОШЕНИЕ. КРИТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ.

Лисин С. К., Федотов А. И. НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ.

Приводятся нелинейные модели анализа параметров объектов с помощью восстановления их функций по экспериментальным данным. Теория оценочного преобразования использована для извлечения из опытов научно-технической информации. Получены методики воспроизведения моделируемых и экспериментальных зависимостей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ. РЕГРЕССИОННЫЙ ФУНКЦИОНАЛ. АППРОКСИМАЦИЯ.

Снежко В. Л. ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В НАПОРНОМ ТУННЕЛЕ ПРИ ЧАСТИЧНОМ ЗАКРЫТИИ ЗАТВОРА.

В статье представлены результаты гидравлического эксперимента, позволяющие сравнить гидродинамическое и гидростатическое давления по длине туннеля, определить места выхода максимальных скоростей на стенки туннеля и возможные места коррозионных и абразивных повреждений.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ. ДАВЛЕНИЕ. ЗАТВОРЫ. НАПОРНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ.

Бабкин А. В., Нестерова Е. И. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ТЕХНИКИ.

Приведен универсальный алгоритм сравнительного квадиметрического анализа функциональных возможностей техники по совокупности выходных квадиметрических характеристик.

ОБРАЗЦЫ ТЕХНИКИ. КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ЧАСТНЫЕ И ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ. КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЕСОМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК.

Васильев Ю. С., Попова В. А. ПОДДЕРЖКА МОЛОДЕЖИ (15 ЛЕТ ФОНДУ ТВН СПбГПУ).

Фонд ТВН был организован в СПбГПУ в 1995 году прежде всего, чтобы восстановить постройку Технологического отдела высокого напряжения. 15 лет прошли, здание было успешно восстановлено. Сегодня главное направление работы Фонда ТВН — поощрение научно-технических новшеств, развитие деловых связей и распространение информации к созданию новых фирм, привлечение талантливых молодых людей в бизнес высокой технологий. Результаты и примеры успешной работы Фонда ТВН приведены в статье.

НОВШЕСТВА. ПРЕДПРИЯТИЯ МАЛОГО БИЗНЕСА. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ПОДДЕРЖКА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ. ГРАНТ ПРОГРАММЫ «СТАРТ». ГРАНТ ПРОГРАММЫ «УМНИК». ФОНД ТВН СПбГПУ.



Винокурова Е. В., Галиновский А. Л., Пудалова Е. И. АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СЕРТИФИКАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ НА ОСНОВЕ ТРЕБОВАНИЙ РАБОТОДАТЕЛЕЙ.

В работе предпринята попытка оценить возможности и перспективы формирования системы сертификации для выпускников и специалистов инженерно-технического профиля. Создание такой системы направлено на решения актуальных задач, связанных с необходимостью сближения требований, предъявляемых рынком труда к высококвалифицированным кадрам, и содержания современного высшего технического образования.

СЕРТИФИКАЦИИ КАДРОВ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ИНЖЕНЕРНЫЕ КАДРЫ.

Иванов А. В. ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ В МЕДИАПРОСТРАНСТВЕ.

Переход на электронные каналы передачи и хранения информации, усиливающаяся роль медиапространства в жизнедеятельности человека и, как следствие, изменение парадигмы сознания общества привели к снижению роли печатных СМИ и ослаблению рынков книгоиздания на бумажном носителе. В статье рассматриваются различные модели дальнейшего развития печатной индустрии в среде университетского книгоиздания РФ на базе технологии цифровой печати.

ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ. МЕДИАПРОСТРАНСТВО. СМИ. ИНФОРМАЦИЯ.

ABSTRACTS

KEYWORDS

Fedosov E. A. The AVIATION INDUSTRY.

The article presents the history of creating aviation in the USSR and in Russia during a century, as well as main tendencies of developing and refining (updating) the Russian aeronautical industry in the prewar years, in the years of the Great Patriotic War (the World War II), in the post-war years and at the present time.

AVIATION. AIRCRAFT MANUFACTURING (PRODUCTION). AIRCRAFT. AERONAUTICAL ENGINEERING (AEROTECHNICS). AERONAUTICAL INDUSTRY ENTERPRISES.

Kozlov V. N., Trosko I. Y. THE ANALYSIS OF CHAOTIC MODES OF ELECTROPOWER SYSTEMS.

In work the mathematical model of an electropower system, including model of the synchronous generator, the turbine and a transfer line is considered. It is shown that at some assumptions concerning entering into model of system of parameters, in it there is the chaotic mode characterized by quickly accruing and uncontrollable fluctuations of phase coordinates. Importance of timely diagnostics of similar processes for the purpose of timely change of structure of system or logic of management isn'ted.

ELECTRIC POWER SYSTEMS. CHAOTIC REGIME SYNCHRONOUS GENERATOR. TURBINE. THE TRANSMISSION LINE.

Andreev K. D., Zabelin N. A., Rassokhin V. A. THE SELECTION OF THE STEAM TURBINE FOR THE STEAM-GAS PLANT ON THE BASE OF THE GAS TURBINE ENGINE.

The possibility to create a steam turbine plant working as a part of combined steam-gas plant on the base of the gas turbine engine is considered.

THE COMBINED PLANT. THE STEAM-GAS PLANT. THE GAS-TURBINES ENGINE. THE STEAM TURBINE.

Pospelov A. U., Georgieva U. G., Jarkovsky A. A. VERIFICATION OF RESULTS OF CALCULATION OF A CURRENT IN A SUCKING AWAY PIPE OF THE WATER-WHEEL OF HYDRO-ELECTRIC POWER STATION.

Numerical investigation result of the flow in the draft tube was represented in this work. Flow simulation was calculated with RANS equation in Fluent software. Comparison the simulation result with the experimental data was made. The main reason of the research was verification the numerical and the experimental data.

DRAFT TUBE. HYDRAULIC TURBINE. CALCULATION. 3D. VISCOSE. FLOW. COMPARISON. EXPERIMENT.

Zender M. S., Chernikov V. A. AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE BLOCK «STAGE — THE OUTPUT DIFFUSER» STATIONARY GAS TURBINE AT VARIOUS OPERATING CONDITIONS.

The experimental investigation results of high power gas turbine unshrouded stage with an axial exhaust diffuser are presented in this paper. The stage run conditions influence on diffuser performance are considered. The procedure for efficiency estimation of «turbine stage — exhaust diffuser» system is offered, and illustrated on an example of back bearing support struts (which located in diffuser) influence for «turbine stage — exhaust diffuser» efficiency.

DIFFUSER. EXPERIMENT. TURBINE STAGE. TURBINE. EFFICIENCY. EXHAUST HOOD.

Nikolaev V. G. DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF RUSSIAN WIND POTENTIAL DEFINITION.

The description of information basis, author's methodic and results of definition and analysis of wind resources in Russia are given in the paper. The main peculiarities of space and temporal variability of wind resources across the territory of Russia were investigated. The qualitative characteristics of WR in different regions of the country were defined with the estimation of their suitability for practical utilization with the modern wind turbines.

WIND POWER ENGINEERING. WIND POWER POTENTIAL. WIND TURBINES. WIND POWER PLANTS. METEOROLOGICAL AND AEROLOGIC STATIONS. METEOROLOGICAL MAST.



R o m a k h o v a G. A., T r e s c h e v D. A. FUEL SAVINGS THROUGH THE USE OF COGENERATION AT COMBINED CYCLE AND GAS TURBINE HEAT POWER PLANTS.

This article describes relative fuel savings through the use of cogeneration at combined cycle and gas turbine heat power plants. There was shown the probability of relative fuel savings use in comparison with separate generation of electrical and heat energy. A fuel savings criterion was taken as one of the criteria of combined cycle power plant (CCPP) optimization based on system concept. There was obtained the dependence between relative fuel savings and cogeneration power plant performance. As a result there was determined that CCPP have the highest fuel savings in comparison with separate generation of heat and electrical energy among the plants of other types.

RELATIVE FUEL SAVINGS. SYSTEM CONCEPT; COGENERATION COMBINED CYCLE POWER PLANT. COGENERATION GAS TURBINE POWER PLANT. ALTERNATIVE CONDENSING POWER PLANT.

M o l o d k i n a M. A. THE THERMAL PUMP IN THE CLOSED SYSTEM OF AIR COOLING OF A TURBOGENERATOR.

The possibility of efficiency by means of introduction heat pump to scheme of circulating water supply and utilization the part of low-potential heat of water-cooling tower's waste water in combined-cycle power plant is investigated in the article. Performances of heat pump introduced into scheme are calculated. Three regime of heat pump's condenser are analyzed and the most effective one is selected.

COMBINED-CYCLE POWER PLANT. HEAT PUMP. CIRCULATING WATER SUPPLY. REGIME. COEFFICIENT OF PERFORMANCE.

B a s s M. S. TECHNO-ECONOMIC EVALUATION OF ENERGY SAVING TECHNOLOGIES (FOR EXAMPLE, THE TRANS-BAIKAL REGION).

In article technical-economic estimation of efficiency of energy-saving actions adoption in Zabaykaliskom Krai. The was considered pay-back period of energy-saving actions introduction for the complex: source — heat network — consumer.

ENERGY-SAVING. SOURCE. BOILER-HOUSE. HEAT CIRCUITS. THERMAL INSULATION. THERMAL ENERGY. LOSS OF HEAT. CONSUMER.

T r e b u n s k i k h S. A., B a t u h t i n A. G. ENTROPIC EFFICIENCY OF HEAT CONSUMING OBJECTS.

The method of determination of entropic efficiency of heat consuming objects is considered in the article. There were made examples of entropic efficiency of heated room, power cycle and heat pump cycle.

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

A l e s h i n a A. S. THERMAL POWER CIRCUITS OPERATING AT THE PLANT BIOMASS.

We consider the schemes of biomass power plants. The equipment and the technical specifications are given. Characteristics of the fuel gas and ways to use it are introduced.

BIOMASS. GASIFICATION. POWER PLANT. GASIFIER.

T r i n c h e n k o A. A. DECREASE OF NOX EMISSIONS BY STAGED FUEL COMBUSTION.

Work is devoted to the decision of problem of struggle against NOx formation at solid fuel combustion in boiler's furnaces. The way of staged fuel combustion and the technological method of NOx decomposition on a surface of carbon particles is considered. The calculation procedure of NOx formation at staged fuel combustion is offered at use. The analysis of experimental and calculated data conformity is given and useability of a new method is defined.

BOILER INSTALLATION. ENVIRONMENT PROTECTION. EMISSIONS. NITROGEN OXIDES.

K u d r y a s h e v a I. G., M i r o s h n i k o v a Ju. A. ABOUT SIGNIFICANS OF PUMPED STORAGE PLANTS IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF UKRAINE.

In article there are the analysis of power stations operating modes and the role of pumped storage plants in the power supply system of Ukraine. Prospects of development of the power supply system at the expense of decrease in a share of generation of thermal power plants and construction of pumped storage plants are considered.

POWER SUPPLY SYSTEM. OPTIMISATION. SYSTEM SERVICES. THE TARIFF POLICY.

K i s e l e v V. G. INFLUENCE OF CONSTANT WANDERING CURRENTS ON SPEED OF CORROSION PROCESSES.

The article reviewed and classified the main methods of corrosion protection of permanent meandering currents of underground metal structures. The specifics of their application within the 9.602-2005.

CORROSION. CORROSION PROTECTION. SECURITY CRITERIA. THE CRITERIA NECESSARY TO PROTECT AGAINST CORROSION. ELECTROCHEMICAL PROTECTION.

Nikolaev V. G. MODELS OF TECHNICAL AVAILABILITY OF WIND TURBINE.

The description of methodical basis and results of development of the models of long term variability of wind turbine maintenance and repair idle standing and technical availability are given in the paper. The models were used for technical reliability of WT and their annual energy output during their prognostic life-time (20 years exploitation).

WIND ELECTRIC TURBINES. REPAIR IDLE STANDING. MAINTENANCE. EXPLOITATION PERIOD. TECHNICAL AVAILABILITY. EXPLOITATION EXPENDITURES.

Karpushina T. I. STUDYING THE CHARACTERISTICS OF CONTEMPORARY MAGNET WIRES' MICA INSULATION DURING HEAT AGING PROCESS.

The article is devoted to studying magnet wires' mica insulation characteristics, which are used in high voltage motors. The results of studying electrical strength, partial discharges and dielectric losses angle tangent are shown. The influence of thermal aging on dielectric losses angle tangent in the wire mica turn insulation is considered in details.

TURN INSULATION (WIRE INSULATION). MAGNET WIRE. DIELECTRIC LOSSES ANGLE TANGENT. PARTIAL DISCHARGE. STATOR COILS. INSULATION ANALYSIS

Pulikov P. G. SCIENTIFIC RESEARCH OF THE HYDROGEN DIFFUSION THROUGH A FLUOROPLASTIC MEMBRANE.

The results of hydrogen diffusion coefficient calculation of fluoroplastic membrane in dependence of temperature for monitoring systems are presented.

TRANSFORMER. MONITORING. DIFFUSION. DISSOLVED GASES. POLYMERIC MEMBRANES.

A bashin M. I., Barzov A. A., Galinovsky A. L., Shuteev V. A. MINIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL COST PRICE OF HYDROABRASIVE CUTTING WITH ALLOWANCE COST AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CUTTING.

In the article the problem of increase technological efficiency hydroabrasive cutting of stuffs is resolved. The technological parameters of cutting are optimized. The mathematical model of the technological cost price of hydroabrasive cutting is designed. The methodical maintenance of optimization parameters of cutting reduces the technological cost price.

HYDROABRASIVE CUTTING. OPTIMIZATION. TECHNOLOGICAL PARAMETERS. CONSUMPTION OF AN ABRASIVE. EFFICIENCY OF TECHNOLOGY.

Rusinov R. V., Dobretsov R. Yu., Gerasimov I. M. ABOUT THERMAL EFFICIENCY OF THE CYCLE OF THE «ADIABATIC» PISTON INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The problem of thermal efficiency of a running cycle of the «adiabatic» engine is considered.
DIESEL ENGINE. ADIABATIC DIESEL ENGINE. RUNNING CYCLE. PROFITABILITY.

Semenov N. V., Rolle V. E. DESIGN PROCEDURE OF THE CAR SUSPENSION VALUES ALLOWING FOR CROSS-SECTION-ANGULAR BODY OSCILLATIONS

An example of middle class car suspension values design procedure is considered. The design procedure allows for cross-section-angular oscillations besides body roll angle. Applying of the design procedure helps to increase correctness of the car angular oscillations calculation and choose necessary car suspension design values.

CAR SUSPENSION. STABILIZER BAR. CROSS-SECTION-ANGULAR OSCILLATIONS. ROLL STIFFNESS.

Solodilova N. A., Chelpanov I. B. THREE-DIMENSIONAL DISPLAY OF ELEMENTS OF DIAGRAM.

In article problems of creation of language of three-dimensional representation of elements of diagrams are considered. Problems of the image of three-dimensional elements of diagrams for various kinds of schematized objects are analyzed.

THREE-DIMENSIONAL DISPLAY. COMPUTER MODELLING. KINEMATIC DIAGRAMS. PNEUMATIC DIAGRAMS. TYPICAL ELEMENTS.

Matsko O. N. EXAMINATION OF CHARACTERISTICS OF NONLINEAR SPRING ACCUMULATOR WITH SLIDING PAIR

This article represents the results of technical ideology development for construction of mechatronic pneumatic recuperative drives for reciprocating movements with the use of spring accumulators having nonlinear power curves depending on the length of movement.

NONLINEAR SPRING ACCUMULATOR. SLIDING PAIR. RECUPERATIVE DRIVE. SPRING. SPRING FORCE.

**Budashov I. A. A LEADING-OUT OF THE FORMULA OF THE POWER CONSUMED BY THE ROTATIONAL-DISK SHREDDER ON PROCESS OF CUTTING.**

In given article the consecutive leading-out of the formula of power of cutting of thickly-stalky cultures is given by the rotational disk shredder. Power formulas are presented in the developed aspect not only depending on a cut principle, but also from key parametres of a design of the shredder and crushing regimes.

POWER. FORCE OF CUTTING. FIXED AND FREE CUTTING. EDGE. EQUALLY EFFECTIVE RESISTANCE.

Hrostitsky A. A., Evgrafov A. N., Tereshin V. A. GEOMETRY AND KINEMATICS OF SPATIAL SIX-LINK MECHANISM WITH REDUNDANT LINKS.

We research the spatial six-link mechanism with redundant. Reveals structural features of the mechanism are determined number of redundant links and calculated the geometric and kinematic parameters, the corresponding characteristics.

MECHANISM. REDUNDANT LINKS. STRUCTURE. GEOMETRY. KINEMATICS.

Gaprindashvili N. K., Semenov A. G. NEW TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR CULTIVATION OF BIOLOGICAL OBJECTS IN ARTIFICIAL CLIMATES.

They Are Brought designed author, on the base of the best technical achievements in the field of hothouse equipment and technology with their use, инновационные offers (the variants) on the further progress in this scientifically based area.

THE PLANT GROWING. AGRICULTURE. ARTIFICIAL CLIMATE. ARTIFICIAL ILLUMINATION. HOTHOUSE.

Rudskoy A. I., Kondratyev S. Yu., Kokorin V. N. NANOSTRUCTURING MATERIALS USING SUPERPLASTICITY EFFECT.

The technology of the introduction of metallic nanomaterials in a matrix-based, followed by three-dimensional forming of using superplasticity effect, which will provide products of a complex space form with a high level of physical and mechanical properties.

NANOMATERIALS. NANOSTRUCTURE. SUPERPLASTICITY. FILTER. TRANSPORTATION. NANOPHASE. METAL POWDER. DEFORMATION.

Barabanshchikov U. G., Chulkin S. G. ANISOTROPY OF ELECTRIC CONDUCTIVITY OF CERAMIC MIXTURE DURING FRICTION.

The results of ceramic mixture friction test were produced. It was ascertained that electrical conduction of ceramic mixture during sliding on metal electrode depends on sense of current. The effect of partial alternating current rectification depends on sliding speed and electrode metal.

FRICTION. CERAMIC MIXTURE. ELECTRICAL CONDUCTION. TRIBOELECTRICITY. RECTIFICATION.

Rudskoy A. I., Kolbasnikov N. G., Ringinen D. A. RECEPTION OF SUBMICRONIC AND NANOCRYSTALLINE STRUCTURE OF METALS BY METHODS OF HOT AND WARM DEFORMATION.

Microstructure formation and mechanical properties of several steels and alloys after a severe plastic deformation at temperatures in the range of 400–1100 °C are performed using *MaxStrain* modulus of the Gleble-3800 system. The temperatures of micro-alloying elements carbonitrides formation and austenite transformation start are determined with help of the *Torsion* modulus. A number of thermo-mechanical treatments are investigated that includes the stages of plastic deformation at temperatures around carbonitrides formation temperature, temperatures in the two phase (austenite-ferrite) range and temperature range of the bainitic transformation. The obtained microstructures are characterized by rather different grain sizes ranging from 0,5"2 mcm down to 100"150 nm. The grain size contribution into final strength of material is analyzed, utilizing the obtained data on mechanical properties and microstructure.

SUBMICRON STRUCTURES. NANOCRYSTALLINE STRUCTURE. HOT FORMING. WARM DEFORMATION. METALL. THERMO-MECHANICAL TREATMENT.

Golod V. M., Emelyanov K. I. THE COMPUTER ANALYSIS OF KINETIC AND FULLNESS OF PERITECTIC TRANSFORMATION.

The computer model of peritectic transformations at nonequilibrium crystallization of alloys on the basis of the conjunct analysis of thermal, crystallization and diffusional processes is developed. Results of the analysis of the conditions controlling the fullness of realisation of peritectic transformation at solidification of castings from carbon and stainless steels and aluminium alloys during formation of a microstructure of alloys of peritectic type are presented.

COMPUTER ANALYSIS. THE PERITECTIC TRANSFORMATION. NONEQUILIBRIUM CRYSTALLIZATION. THE MICROSTRUCTURE OF ALLOYS. HARDENING STEEL AND ALUMINUM ALLOYS.

Kolbasnikov N. G., Mishin V. V., Shishov I. A., Zabrodin A. V. RESEARCH OF PRESSING OF HIGHLY POROUS NANOSTRUCTURED SPONGE OF A BERYLLIUM.

Hydride technology of high – purity beryllium includes subsidence of highly porous beryllium sponge in the metal shell at 700 °C in vacuum to produce billets for hot rolling. The form of beryllium billet is not during this process and leads to uneven deformation during rolling and destruction of beryllium. This form of billet is unacceptable and leads to uneven deformation during rolling and destruction of beryllium. Compaction of highly porous beryllium sponge was researched in this work using the finite element method. A comparison of modeling results with real subsidence at the press was performed, the high similarity between the model and experimental data was noted. The reasons of undesirable polythickness in beryllium billet was exposed and recommendation to avoid it was developed.

HYDRIDE TECHNOLOGY. NANOCRYSTALLINE BERYLLIUM. NANOCRYSTALLINE STRUCTURE. ROLLING OF BERYLLIUM IN THE CONTAINER. OBTAINING OF A FOIL FROM A BERYLLIUM.

Ganzulenko O. Y., Kirillov N. B., Petkova A. P., Yakovitsky M. V. STUDY OF THE HYDROGEN PERMEABILITY AND EVALUATION OF PERFORMANCE OF AUSTENITIC STEELS AND ALLOYS IN HYDROGEN-CONTAINING ENVIRONMENTS.

Revealed the concentration and temperature dependence of hydrogen permeability through the proposed steel and analogues. A mathematical model of the dependence of hydrogen permeability of the proposed steel and analogues in the temperature range 300–700 °C. Based on comparative analysis of key operational and technological characteristics of the proposed steel and existing analogue recommended its use for the manufacture of thin-walled constructions of *high-temperature technology* systems technology systems of atomic and hydrogen energy prolonged exposure of various hydrogen-containing environments.

HYDROGEN PERMEABILITY. AUSTENITIC STEELS AND ALLOYS.

Pupyshev A. M., Popov I. O. RESEARCH OF MACROKINETIC CONFORMITIES TO LAW OF RENEWAL OF DIFFICULT OXIDE IRON-TITANIUM CONCENTRATES CARBON OF COKE AND LIQUID HYDROCARBONS.

Mechanisms and macrokinetics of the worked out gas-producing method of renewal of difficult complex oxide iron-titanium concentrates are investigational in the system «iron-titanium concentrate – tape of hydrocarbon oil-fuel (C_nH_m) + carbon» by comparison to the fundamentally studied system «iron-titanium concentrate – carbon».

GAS-PRODUCING METHOD. ILMENITE. TITANOMAGNETITE. DISOXIDATION. HYDROCARBON. MACROKINETIC.

Nikolaev Yu. K., Zelenin Yu. V., Kondratyev S. Yu. INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF METAL SEAM ON THE CHARACTER OF FAILURE OF AUSTENITIC STEEL WELDS.

The article deals with the causes of brittle fracture of weld joints of chrome-nickel austenitic steels during operation at elevated temperatures. It is shown that the formation of a relatively high number of sigma-phase in the structure of the metal weld and welded steel leads to embrittlement. Necessary conditions to prevent the possibility of brittle fracture of welded joints of austenitic steels at high temperature operation were formulated.

AUSTENITIC STEEL. MICROSTRUCTURE. HEAT AGING. BRITTLE FRACTURE. WELD JOINTS.

Akulichev A. G., Andreeva V. D., Trofimov V. V. MICROSTRUCTURE OF CARBONITRIDED 20X3MBФ-III GRADE STEEL AFTER QUENCHING AND FOLLOWING TREATMENT.

The investigation of the fine microstructure of carbonitrided 20X3MBФ-III grade steel, which was subjected to different heat treatments, is performed by modern whole powder pattern fitting method. Changes of microstructure parameters of the main phases depending on depth of the carbonitrided layer are shown. The explanation of nonmonotonic dependencies of the microstructure parameters in the carbonitrided steel is given.

HIGH TEMPERATURE CARBONITRIDING. HEAT TREATING. X-RAY DIFFRACTION. WHOLE POWDER PATTERN FITTING. MICROSTRUCTURE.

Mishin V. V., Shishov I. A., Zabrodin A. V., Markushkin Y. E. SUBSTANTIATION OF CRITERION OPTION FOR DESCRIBING FRACTURE OF LOW-PLASTIC METALS UNDER COLD ROLLING

Cold rolling of a hot-pressed and hot-rolled beryllium with the thickness of 200-500 microns is one of the most difficult manufacturing processes of high-purity nanocrystalline beryllium. Any deformation inhomogeneity through a width and length of the deformation hearth substantially reduces beryllium technological plasticity and may cause the material fracture. In the present study the analysis was carried out. The criterion of fracture which can be used for plastic deformation modes option for low-plastic materials was developed.

HYDRIDE TECHNOLOGY. NANOCRYSTALLINE BERYLLIUM. NANOCRYSTALLINE STRUCTURE. LOW-PLASTIC METALS. CRITERION OF FRACTURE. COLD ROLLING OF BERYLLIUM. OBTAINING OF A FOIL FROM BERYLLIUM.



Sufiyarov V. Sh., Golod V. M. THE ANALYSIS OF CONDITIONS FOR CHANGING OF CRYSTALLIZATION FRONT MORPHOLOGY DURING SOLIDIFICATION OF LOW-ALLOYED STEELS.

The algorithm of an estimation of morphology in the time of crystallization of multicomponent alloys at consecutive transition from flat front to cellular and dendrite structure are developed. The results of the analysis for conditions determining the morphological transitions during formation of a casting microstructure from carbon and low-alloy steels are presented. The comparative influence of a steel components on formation of cellular and dendrite microstructures is established.

CRYSTALLIZATION FRONT. THE PLANE FRONT. CELLULAR STRUCTURE. DENDRITIC STRUCTURE. LOW ALLOY STEEL.

Popov N., Pupysh A. M. THE GAS-PRODUCING METHOD OF SELECTIVE DISOXIDATION OF COMPLEX OXIDE IRON-TITANIUM CONCENTRATES.

The article is devoted to creating new effective complex technology for ilmenite and titanomagnetite concentrates of the Kola Peninsula processing. The technology is developed by the gas-producing method of selective disoxidation of complex oxide iron-titanium concentrates, using as a reducing liquid hydrocarbon fuel.

GAS-PRODUCING METHOD. ILMENITE. TITANOMAGNETITE. DISOXIDATION. HYDROCARBON.

Novikov N. I., Kazakov S. P. QUANTITATIVE ASSESSMENT OF DIRECTIONS HORIZONTAL DIVERSIFICATION METALLURGICAL.

In the article explored the way of quantifying directions diversification of metallurgical production, their mathematical interpretation, positive and negative points. Using statistical and accounting records of the largest steel companies and enterprises of the Russian Federation, the estimate of their level of diversification by using different ways of measuring it.

STRATEGY. DIVERSIFICATION. QUANTIFICATION. VOLUME OF PRODUCTION. BUSINESS. SEGMENT. EFFICIENCY. INVESTMENT PROJECT.

Moskovin P. A. BIOFUELS FOR CARS AND THE PROBLEM OF ITS APPLICATION.

Various types of biofuels for cars. Their positive and negative aspects. Problems of application of biofuels from various raw materials.

BIOFUELS. BiOGAS PRODUCTION. ETHANOL — BIOFUEL SUBSTITUTE FOR PETROL. BIODIESEL — BIOFUEL SUBSTITUTE FOR DIESEL.

Isabekov T. A., Lavrov N. P. ALGORITHM OF MANAGEMENT OF WATER DISTRIBUTION ON TRANSBOUNDARY HYDROKNOT CHUMYSHSKY.

The model of management by processes of water distribution between Kyrgyzstan and Kazakhstan on hydroknot Chumyshsky is considered. The rational scheme of a manipulation by dam gates is offered.

ALGORITHM OF MANAGEMENT. HYDROKNOT CHUMYSHSKY. WATER BALANCE. MANIPULATION OF GATES.

Igolkin B. I., Vasil'eva L. K., Mekhtiev V. S., Vasipov V. V., Rebane K. Y. ELECTRICAL VEGETABLE OIL DEPENDING ON TEMPERATURE AND FREQUENCY OF ELECTROMAGNETIC OSCILLATIONS.

This article shows that the frequency-temperature curves of the conduction of various vegetable oils in the coordinates of the electrical conductivity-frequency have a point of intersection, whose position and character of the curves themselves can serve as a basis for establishing an operational method for assessing the state (quality) of liquid vegetable oils.

ELECTRICAL. VEGETABLE OILS. THE TEMPERATURE DEPENDENCE. FREQUENCY OF ELECTROMAGNETIC OSCILLATIONS.

Kefeli I. F. THE GLOBAL WEAPON: BACKGROUND AND REAL PROBLEMS OF THE PRESENT

Article is devoted the modern global weapon, its kinds and application. The history of occurrence of the nuclear weapon and that time when there was obvious a necessity of its reduction and control is considered. The concept analysis «Fast global blow» is carried out. The problem of political and strategic domination in the world, and also a role of the global weapon in struggle for this domination and danger of its further development is discussed.

GLOBALIZATION. THE GLOBAL WEAPON. STRATEGIC NUCLEAR FORCES. THE NESTRATEGICHESKY NUCLEAR WEAPON. «FAST GLOBAL BLOW». «NETWORK-CENTRIC WARFARE».

Barakovskih S. A., Arkanov P. V. EVALUATION OF THERMALPHYSIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE STRUCTURE OF FIREPROOF CONSTRUCTIONS AT FIRES INVOLVING OIL-AND-GAS FACILITES.

Dependences of heat and physical properties of constructions are probed taking in a thermal radiation at fires on objects of oil and gas industry, experimentally-measuring and theoretical job performances at development of fireproof constructions.

THERMAL STREAM. AIRILY-MECHANICAL SUDS. FIREPROOF CONSTRUCTION. HEAT CONDUCTIVITY. CLOSENESS. HEAT CAPACITY.

Gumenyuk V. I., Atoyan G. L., Syrov A. A. ENSURING PROTECTABILITY AND COST MINIMIZATION OF NUCLEAR FUEL HANDLING FOR WMWC REACTORS.

The article is devoted to creation of a simulation model of protectability applied to fuel-handling machine used on nuclear power plants equipped with WMWC type reactors.

With the help of the computer program created by the authors imitation modeling is used for obtaining average overall costs of a full process of fuel-handling on the assumption of maintaining protectability index (destruction probability) value.

Average costs of fuel-handling are estimated for various levels of a crucial parameter — probability of destruction of a driving stem rod. The minima of the costs are calculated for the two rod degradation models.

NUCLEAR POWER PLANT. WMWC REACTOR. FUEL-HANDLING MACHINE. NUCLEAR FUEL. DANGER. SAFETY. ACCIDENT. RISK. PROTECTABILITY. INDEX OF PROTECTABILITY. DESTRUCTION MODEL. DEGRADATION. RELIABILITY THEORY. CRUCIAL OBJECTS. DRIVING STEM ROPE. FUEL ROD ARRAY. FUEL ELEMENT.

Rozov A. L., Belyanin V. A. ENSURING OF FIRE SAFETY OF ECONOMY AND SOCIAL OBJECTS IN MARKET ECONOMY.

In this article analyzed the problems connected with the acceptance decisions in planning inspections of fire safety conditions of objects. In this article are analyzed the problems of determination of the base indexes which influence on the probability of ignition on the objects of the defense. The theory of probability is used for determination of the base indexes.

PLAN INSPECTION. SOURCE OF FIRE. HUMAN FACTOR. CATASTROPHE THEORY. CATASTROPHE POINT. THREAT OF FIRE. OUTBREAK OF FIRE. SOURCE OF FIRE. IGNITION.

Ivanova T. Y. ESTIMATION OF VOLUMES OF POSSIBLE EMERGENCY FLOODS OF OIL PRODUCTS.

In article known techniques of an estimation of volumes of possible emergency floods of oil and oil products are considered, their positive features and lacks are revealed. More rational way of an estimation of probability of the expiration of oil also is offered.

VOLUME. OIL. THE PIPELINE. PROBABILITY. THE EXPIRATION. RUPTURE. THE PUNCTURE.

Akulov A. Y., Smirnov V. V. ALGORITHM OF DESIGNING OF FIREPROOF COMPOUND FOR METAL DESIGNS OF OBJECTS OF OIL-AND-GAS BRANCH.

Necessity of development of fireproof compound for metal designs of oil-and-gas branch is given in this work. The technique and algorithm of designing of fireproof compound are resulted.

FIRE RESISTANCE. FIREPROOF COMPOUND. A TECHNIQUE OF DESIGNING OF STRUCTURES. ALGORITHM OF DESIGNING OF STRUCTURES.

Borovikov V. A, Slastenko V. K. NEW WAY OF DEFINITION OF EFFICIENCY INDUSTRIAL EXPLOSIVES THE METHOD OF UNDERWATER EXPLOSION.

In article the question of an estimation of efficiency of action of explosion of industrial explosives (IE) in rocks and firm environments of various acoustic rigidity is considered. Data on features of distribution of potential energy of a charge depending on physicomechanical properties of environment, to explosion action are resulted. The new way of definition of efficiency ПВВ, considering dissipative losses of energy of the explosion, depending on acoustic rigidity of the destroyed firm environment and an impedance of products of a detonation is offered. The technique of measurement of parameters of the wave of pressure refracted in water by means of piezoelectric gages of pressure and a measuring equipment complex is resulted. Results of experimental measurements of two types IE essentially differing under detonation characteristics — the Granulite and low-density a granulite, blown up in the concrete blocks modeling breeds of average acoustic rigidity are presented.

EXPLOSIVE. ACOUSTIC RIGIDITY. THE METHOD OF THE WAVE REFRACTED IN WATER. PARAMETERS OF THE WAVE OF PRESSURE. EFFICIENCY OF ACTION OF EXPLOSION.

**Kosmach V. F. THE QUANTUM-MECHANICAL METHOD OF ANALYSIS OF THE ABSOLUTE SCALE OF GEOLOGICAL CHRONOLOGY OF THE EARTH.**

In the present article a quantum-mechanical method of analysis of geological history of Earth, on the basis of which sufficient to experiment lengths of epochs for the late $550 \cdot 10^6$ years were found and length of the Latest epoch (Holocene) was predicted, is suggested.

GEOLOGICAL EPOCH. EARTH. QUANTUM-MECHANICAL METHOD OF ANALYSIS.

Kabalyk K. A., Krylowicz W. VERIFICATION of THE NUMERICAL MODEL of VISCOUS GAS FLOW WITHIN THE CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGE.

Three - dimensional numerical analysis of the viscous gas flow is applied to obtain flow angle in the absolute frame of reference radial distribution at the impeller inlet and to calculate stage performance dimensionless characteristics. The influence of mesh quality, turbulence model and inlet turbulence intensity on the simulation outcome is investigated. Numerical results are compared to the experimental ones.

CENTRIFUGAL COMPRESSOR. NUMERICAL SIMULATION. MESH INDEPENDENCE. TURBULENCE.

Sazanov D. N. MODELLING OF COLUMNS OF BOX SECTION FROM THIN WALLED PROFILES.

In article the box profiles and shift deformations, questions of shift efforts and stress are considered. Carrying out of analogies for behave of adequate models for thin walled profiles from a high-strength steel with thickness less 1,0mm are considered also.

ULTIMATE LOAD. BUCKLING. THIN-WALLED STEEL PROFILES. MODELLING. FORMS OF BUCKLING.

Barabashchikov U. G., Chulkin S. G. DISPERSED MIXTURE FRICTION ON BASE OF PORTLAND CEMENT.

Friction process features of dispersed mixture on base Portland cement were found by means of experimental research. It was ascertained that there is a critical value of downforce lower of which a flow in mixture volume has place and upper of which - sliding on surface only.

FRICITION. PORTLAND CEMENT. DISPERSED MIXTURE. WATER-TO-CEMENT RATIO. CRITICAL PRESSURE.

Lisin S. K., Fedotov A. I. NONLINEAR MODEL OF APPROXIMATE CALCULATIONS IN PROBLEMS OF ANALYSIS OF THE EXPERIENCE.

Given non-linear models analysis of parameters of objects by restoring their functions to the experimental data. Theory of valuation used to extract the transformation of experience in scientific and technical information. Obtained by techniques play simulated and experimental curves.

MATHEMATICAL MODEL. NUMERICAL SOLUTION. THE FUNCTIONAL REGRESSION. APPROXIMATION.

Snezko V. L. HYDRODYNAMIC PRESSURE IN PRESSURE TUNNEL WITH THE PARTIAL CLOSING OF THE SHUTTER

This paper presents the results of hydraulic experiments to compare the hydrodynamic and hydrostatic pressure along the length of the tunnel to determine the maximum speed on the walls of the tunnel and the possible locations of corrosive and abrasive damage.

HYDRAULIC STRUCTURES. PRESSURE. FLAT VALVES. PRESSURE PIPES.

Babkin A. V., Nesterova E. I. MODELS AND ALGORITHMS FOR QUALIMETRIC ASSESSMENT MODELS OF DEVICES.

An universal algorithm for comparative analysis qualimetric features of devices to aggregate output of qualitative characteristics is offered.

MODEL OF DEVICE. QUALIMETRIC CHARACTERISTICS. PRIVATE AND SYNTHESIS OF DATA. INTEGRAL CRITERIA. WEIGHTS OF CHARACTERISTICS.

Vasiliev Yu. S., Popova V. A. SUPPORT FOR YOUNG DEVELOPERS AND INNOVATIONS — TVN FUND SPBSTRU CELEBRATES IT'S 15 ANNIVERSARY.

TVN Fund SPBSTRU was organized in 1995 primarily in order to restore building of High Voltage Technology department. 15 years have passed, building have been successfully restored.

Today main direction of TVN Fund is promotion of scientific and technical innovations, development of business links and dissemination of information towards creating new businesses, involvement of talented young people into high technology business.

Results and examples of success achieved by TVN Fund are given in this article.

INNOVATIONS. SMALL BUSINESSES. RESEARCHES AND DEVELOPMENTS. SUPPORT FOR YOUNG SCIENTISTS. «START» GRANT PROGRAM «UMNIK» GRANT PROGRAM. TVN FUND SPBSTRU.

Vinokurova E. V., Galinovsky A. L., Pudalova E. I. THE ANALYSIS OF OUTLOOKS
CREATION OF A CERTIFICATION SYSTEM FOR ENGINEERING STAFF ON THE BASIS REQUIRE-
MENTS OF THE EMPLOYERS.

In the article the capabilities and outlooks of formation certification system for the graduates and specialists of a technical-engineer profile are estimated. This system is indispensable for the solution of actual problems. For example for the count of the requirements employers in the contents of a modern technical education.

CERTIFICATION OF STAFF. MEASURING STUFFS. ENGINEERING STAFF.

Ivanov A. V. THE DIGITAL PRESS IN MEDIA SPACE.

Digital printing in the university publishing in the Russia and USA, technology internet and technology «iPad» are developing in the nearest future. This article about different models researching ways developing printing digital industry in the global information sphere.

THE DIGITAL PRESS. MEDIA SPACE. MASS-MEDIA. THE INFORMATION.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 2 (123) 2011

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция

академик РАН *Ю.С. Васильев* – председатель редакционной коллегии
д-р ист. наук профессор *Р.В. Дегтярева* – заместитель председателя
д-р техн. наук профессор *В.Н. Боронин* – заместитель председателя
канд. техн. наук доцент *Л.В. Спириданова* – научный редактор, корректор
Н.П. Измайлова – помощник выпускающего редактора
О.А. Матенев – технический секретарь

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 26.08.2011. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 54,25. Тираж 1000. Заказ 261.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ» Серия «Наука и образование»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Он зарегистрирован в Госкомпечати РФ (свидетельство № 013165 от 23.12.94) 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; СТРОИТЕЛЬСТВО; МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ; ПЕДАГОГИКА; ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ.

Журнал выпускается в пяти сериях:

1. Физико-математические науки.
2. Экономические науки.
3. Наука и образование.
4. Информатика. Телекоммуникации. Управление.
5. Гуманитарные и общественные науки.

Периодичность выхода серии журнала «Наука и образование» – 4 номера в год.

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;
- рекомендация на имя заместителя главного редактора журнала, подписанная научным руководителем автора и/или руководителем структурного подразделения. Рекомендация должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров;
- 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 редакция может потребовать представления акта экспертизы.

Все материалы должны быть представлены по электронной почте: e-mail: ntv-nauka@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